

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka, Imatra
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Henri Hyypiä

IMATRAN SEUDUN SÄHKÖ OY:N JAKELUVER- KON MAADOITUSTEN NYKYTILAN SELVITYS JA TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Opinnäytetyö 2011

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

Henri Hyypiä

Imatran Seudun Sähkö Oy:n jakeluverkon maadoitusten nykytilan selvitys ja toimenpide-ehdotukset, 103 sivua, 6 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Imatra

Tekniikka, sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2011

Ohjaajat: Lehtori Seppo Jaakkola, Saimaan amk, verkostopäällikkö Petri Tikka, Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy

Työn tarkoituksena oli selvittää Imatran Seudun Sähkö Oy:n omistaman jakeluverkon maadoitusten nykytila mittausten avulla ja pohtia parannusehdotuksia, mikäli maadoitusjännitteiden arvot ylittävät standardissa SFS 6001 määritellyt suurimmat sallitut arvot.

Mittausten piiriin kuuluvien muuntopiirien maadoitukset mitattiin käännepistemenetelmällä pääosin kesän 2010 aikana. Tulosten perusteella liian suuret maadoitusjännitteet ovat ongelma valtaosassa muuntopiireistä. Maadoitusjännitteiden pienentämiseksi tutkittiin eri vaihtoehtoja standardien SFS 6000 ja SFS 6001 reunaehdot huomioiden. Tarkasteltaviksi vaihtoehtoiksi valittiin maasulkuvirran keskitetty kompensointi, lisämaadoitusten asentaminen ja releasetteluiden muutokset.

Tarkastelussa käytettiin apuna verkkotietojärjestelmää, keskeytyslaskennan tuloksia, kustannuslaskelmia sekä parasta mahdollista tietoa jakeluverkon tulevaisuuden muutoksista.

Tulosten pohjalta päädyttiin suosittelemaan keskitetyn kompensointilaitteiston investointia Saarlammen sähköasemalle, jolla saadaan sekä maadoitusjännitteet riittävän alhaiselle tasolle että säästöjä vähentyneinä keskeytyskustannuksina. Imatran alueen sähköasemien kohdalla lisämaadoitusten rakentaminen yhdessä releasettelujen kanssa osoittautui nykytilanteen perusteella varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. Kuitenkin epävarmuus laskennassa käytettyjen muutujien ja tulevaisuuden suhteen vaikeuttaa investointipäätöksen tekoa. Venonmäen ja Syyspohjan sähköasemien tapauksessa kompensointi ei osoittautunut kannattavaksi keskeytyskustannusten suhteen ja lisämaadoituksista aiheutuneet kustannukset nousisivat kohtuuttoman suuriksi. Suurista investointikustannuksista ja laskelmien epävarmuustekijöistä johtuen näiden kahden sähköaseman tapauksessa eri menetelmien uudelleenarviointi muutaman vuoden kuluttua nähtiin tarpeellisena ennen varsinaisen toimenpiteen valintaa.

Asiasanat: maadoitusresistanssi, maadoitusjännite, kosketusjännite, maasulku, maasulkuvirran kompensointi, jakeluverkko, SFS 6001

ABSTRACT

Henri Hyypiä

An Analysis of Present State of the Earthings of Imatran Seudun Sähkö Ltd.'s Distribution Network and Proposals for Action, 103 pages, 6 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Imatra

Technology, Degree Programme in Electrical Engineering

Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis 2011

Instructors: Mr Seppo Jaakkola, Senior Lecturer, Saimaa UAS, Mr Petri Tikka, Network Manager, Imatran Seudun Sähkösiirto Ltd.

The purpose of this study was to determine the present state of the earthings of Imatran Seudun Sähkö Ltd.'s distribution network with the ground connection resistance measurements and to examine amendments if the values exceed maximum ratings defined in the SFS 6001 standard.

The earthing of the transforming districts that were part of this study were measured with a fall-of-potential method mainly during the summer 2010. Based on the results, the earthing voltages cause a problem in majority of the transforming districts. Different options for reducing earthing voltages were researched taking into account the boundary conditions of the standards SFS 6000 and SFS 6001. The chosen methods were central compensation of earth fault currents, installation of additional earthings and reconfiguration of the relays.

The examination was done with the help of network information system, the results of outage and cost calculations and the best possible knowledge of distribution network's future changes.

Based on the results, investment in central compensation of earth fault currents for Saarlampi substation seemed a viable solution which makes it easier to achieve sufficiently low earthing voltage levels but also brings savings as reduced outage costs. For the substations in the Imatra region the combination of installation of additional earthings and reconfiguration of the relays proved to be an option worthy of consideration on the basis of the present state. However uncertainty in terms of the parameters used in calculation and the future may complicate the investment decision. In the case of Vennonmäki and Syyspohja substations central compensation of earth fault currents did not prove to be a cost-effective solution in terms of outage costs, and costs of additional earthings would rise unreasonably high. Due to high capital costs and uncertainty factors of the calculations, reassessment of the methods after a few years was seen necessary before choosing the actual measure.

Keywords: Earthing Resistance, Earthing Voltage, Touch Voltage, Earth Fault, Compensation of Earth Fault Current, Distribution Network, SFS 6001

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	8
2 MAADOITUS.....	9
2.1 Maadoituksen tarkoitus.....	9
2.2 Maadoitukselle asetetut vaatimukset	9
2.2.1 Käyttöönotto- ja määräaikaismittaukset	10
2.3 Maadoitusresistanssi	11
2.3.1 Palloelektrodi joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa.....	12
2.3.2 Palloelektrodi maan pinnassa	13
2.3.3 Palloelektrodi tiettyyn syvyyteen upotettuna	14
2.3.4 Kaksi samanlaista palloelektrodia maan pinnassa.....	16
2.3.5 Eryttypisten maadoituselektrodien laskentakaavoja.....	18
2.3.6 Maaperän resistiivisyys.....	20
2.4 Maadoitusjärjestelmien rakenne	22
2.4.1 Verkkomainen maadoitusjärjestelmä	22
2.4.2 Suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteinen maadoitus.....	23
2.5 Maadoituksen suunnittelu- ja mitoitusperusteet.....	24
2.5.1 Elektrodin rakenne	24
2.5.2 Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys.....	25
2.5.3 Terminen lujuus	25
2.5.4 Sallitut maadoitus- ja kosketusjännitteet	28
3 MAASULKU	31
3.1 Maasulusta aiheutuneet keskeytykset	32
3.2 Keskijänniteverkon maadoitustapa	36
3.2.1 Maasta erotettu keskijänniteverkko.....	37
3.2.2 Sammutettu keskijänniteverkko	37
3.3 Maasulkuvirta.....	38
3.3.1 Maasulun aikaiset muutosilmiöt	39
3.3.2 Yksivaiheinen maasulkuvirta erotetussa verkossa.....	40
3.3.3 Yksivaiheinen maasulkuvirta sammutetussa verkossa	42
3.4 Maasulkusuojaus	44
3.4.1 Maasulkusuojaus suunnittelu ja toteutus.....	44
3.4.2 Maasta erotetun ja sammutetun verkon suojaus eroavaisuudet ..	46
3.4.3 Maasulkusuojaus haasteet.....	47
4 MAADOITUKSEN MITTAUSMENETELMÄT	48
4.1 Voltti-ampeerimenetelmä	49
4.2 Käännepistemenetelmä	50
4.2.1 Mittaaminen	50
4.2.2 Virhetekijät	54
5 ISSOY:N JAKELUVERKKO	55
5.1 Jakeluverkon rakenne.....	55
5.1.1 Jakeluverkon maadoitukset	57
5.1.2 Keskijänniteverkon maadoitustapa	58
5.1.3 Maasulkusuojaus	58
5.2 Keskeytykset.....	59
5.3 Verkon kunto ja investoinnit.....	60
5.4 Maasulkulaskelmat	62
6 MAADOITUSMITTAUKSET	63

6.1 Mittauslaitteisto.....	64
6.2 Mittaaminen.....	65
7 TULOSTEN TARKASTELU.....	67
7.1 Maasulkulaskenta.....	67
7.1.1 Maadoitusresistanssien mitoitusvirrat.....	69
7.2 Maadoitusmittaukset.....	70
8 VAIHTOEHDOT MAADOITUSJÄNNITTEIDEN PIENENTÄMISEKSI.....	74
8.1 Maasulkuvirran kompensointi.....	76
8.1.1 Saarlammen sähköasema.....	78
8.1.2 Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemat.....	79
8.2 Maasulkureleiden hidastusajat.....	80
8.2.1 Vennonmäen sähköasema.....	81
8.2.2 Imatran alueen sähköasemat.....	81
8.3 Maadoitusresistanssien pienentäminen.....	82
8.3.1 Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemat.....	84
8.3.2 Imatran alueen sähköasemat.....	87
8.4 Herkkyysanalyysi.....	89
8.4.1 Maasulkuvirran kompensointi.....	89
8.4.2 Releasettelut.....	90
8.4.3 Maadoitukset.....	91
9 TOIMENPIDE-EHDOTUKSET.....	92
9.1 Maasulkuvirran kompensointi Saarlammen sähköasemalla.....	92
9.2 Imatran alueen sähköasemat.....	92
9.3 Lisätutkimukset Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemilla.....	93
9.4 SFS 6000 -standardin vaatimusten täyttäminen.....	94
9.5 Maadoitusten maastotarkastukset.....	94
9.6 Uusintamittaukset.....	95
9.7 Muutokset verkkotietojärjestelmään.....	95
10 YHTEENVETO.....	96
KUVAT.....	98
KUVAAJAT.....	98
TAULUKOT.....	99
LÄHTEET.....	101

LIITTEET

- Liite 1 Maadoituselektrodien materiaalit ja vähimmäismitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden takia (SFS 6001)
- Liite 2 Maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät virrat (SFS 6001)
- Liite 3 ISSOY:n keskijänniteverkko ja sähköasemat
- Liite 4 Maadoituksen tarkastuspöytäkirja
- Liite 5 Maadoitusresistanssien mittaustulokset johtolähdöittäin
- Liite 6 Jakeluverkon maaperäkarta (GTK)

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	poikkipinta-ala (mm ²)
C	kapasitanssi (F)
D	halkaisija (m)
d	halkaisija (m)
h	syvyys (m)
I	virta (A)
j	imaginääriyksikkö
K	taittumiskerroin
k	maasulkukerroin, rakennetekijän määräävä kerroin
KAH	KAH-arvo (€/kW, €/kWh)
L	induktanssi (H), pituus (m)
p	korkotaso (%)
R	resistanssi (Ω)
r	reduktiokerroin
s	etäisyys (m), paksuus (m)
t	aika (s), investoinnin tarkasteluaika (a)
U	jännite (V)
β	resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo
ε	annuiteettikerroin
θ	lämpötila (°C)
ρ	ominaisresistiivisyys (Ωm)
φ	vaihekulma (°)
ω	kulmataajuus (1/s)

Alaindeksit

0	tähtipiste-, nolla-
C	kapasitiivinen-
i	alku-
f	vika-, loppu-

E	maadoitus-, maasulku-
EM	maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välinen
L	vaihe-, induktiivinen-
M	mittaus-
Res	jäännös-
TP	kosketus-

Yläindeksit

' vaiheiden välinen

Lyhenteet

AJK	Aikajälleenkytkentä
EMV	Energiamarkkinavirasto
ISSOY	Imatran Seudun Sähkö Oy
JHA	Jälleenhankinta-arvo
KAH	Keskeytyksestä aiheutunut haitta
KJ	Keskijännite
NKA	Nykykäyttöarvo
NKA%	Nykykäyttöarvoprosentti
RKI	Rakennuskustannusindeksi
PAS	Päällystetty avojohto suurjännitteelle
PEN	Yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin
PJ	Pienjännite
PJK	Pikajälleenkytkentä

1 JOHDANTO

Maadoittamisella tarkoitetaan virtapiirin osan tai laitteen johtavan osan yhdistämistä maadoituselektrodilla maahan. Maadoituksilla on suuri merkitys henkilöturvallisuuteen sekä omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen ehkäisemiseen. Standardi SFS 6001 Suurjänniteasennukset määrittelee suurimmat sallitut maadoitusjännitteet kosketusjännitteen avulla. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää Imatran Seudun Sähkö Oy:n jakeluverkon muuntopiirien maadoitusten nykytila maadoitusmittausten avulla. Työn varsinainen toimeksiantaja on Imatran Seudun Sähkösiirto Oy. Maadoitusjännitteiden pienentämiseksi on keksittävä parannusehdotuksia, mikäli ne ylittävät mitattujen maadoitusvastusten sekä maasulkuvirtojen suuruuksien ja kestoaikojen avulla lasketut suurimmat sallitut arvot.

Nykyinen sähkömarkkinalaki edellyttää, että jakeluverkko- ja sähkönmyyntitoiminnot on eriytettävä. Tästä johtuen on perustettu 1.1.2006 Imatran Seudun Sähkösiirto Oy, joka on täysin Imatran Seudun Sähkö Oy:n omistama tytäryhtiö. ISSS vastaa sähkönjakelusta sekä jakeluverkon rakennuttamisesta ja kunnossapidosta ja sillä on palveluksessa yhdeksän vakinaista henkilöä.

ISSOY konsernin muodostavat emoyhtiö Imatran Seudun Sähkö Oy ja sen kolme tytäryhtiötä: Imatran Seudun Sähkösiirto Oy ja Imatran Seudun Sähkörakennus Oy, jotka ovat täysin emoyhtiön omistamia sekä Imatran Energia Oy, josta se omistaa 75 prosenttia. Konsernin liiketoiminta koostuu sähköenergian hankinnasta, myynnistä ja siirrosta, verkon rakentamisesta ja kunnossapidosta sekä sähköenergian ja kaukolämmön tuotannosta. Tulevaisuudessa energiaomavaraisuutta on aikomus nostaa uudella kiinteän biopolttoaineen voimalaitoksella. Vuonna 2010 konsernin liikevaihto oli 28,1 milj. euroa ja sähköenergiaa siirrettiin ennätyselliset 289,5 GWh. Käyttöpaikkojen lukumäärä ja sähköverkoston pituus kasvoivat hieman edellisvuodesta. Suurin yksittäinen investointi oli Syyspohjan kevyt sähköasema, joka rakennettiin sähkönlaadun parantamiseksi. Kokonaisuudessaan konserni työllisti noin 61 henkilöä. (ISSOY.)

2 MAADOITUS

Maadoitukset jaetaan käyttö-, suoja- ja työmaadoituksiin. Käyttömaadoituksella tarkoitetaan sähkölaitteen virtapiiriin kuuluvan ja suojamaadoituksella virtapiiriin kuulumattoman johtavan osan liittämistä maadoitusjärjestelmään. Työmaadoituksella estetään vaarallisen jännitteen syntyminen työkohteeseen yhdistämällä kaikki virtapiirin osat toisiinsa ja maahan. Maadoitusjärjestelmä on kokonaisuus, johon on liitetty johtavasti maadoituselektrodit tai vaikutukseltaan vastaavat metalliosat, maadoitusjohtimet ja potentiaalintasausjohtimet. Potentiaalintasauksen tarkoitus on saavuttaa tasapotentiaali kaikkien johtavien osien välille. (Tolppanen 1979; STUL 2007.)

2.1 Maadoituksen tarkoitus

Maadoituksen ensisijainen tarkoitus on lisätä sähkölaitteen turvallisuutta ja ehkäistä laitteiden vaurioitumista vikatilanteissa. Tärkeimpiä tekijöitä henkilöturvallisuuden kannalta ovat kosketus- ja askeljännitteet. Vikavirralla täytyy olla luotettava reitti maahan maadoitusjärjestelmän osien kautta, jolloin estetään myös vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen ja luodaan toimintaedellytykset maasulku- ja vikasuojaukselle. Vika voi esiintyä pien- tai suurjännitejärjestelmässä. Myös ilmastolliset ylijännitteet rinnastetaan viaksi. (STUL 2007.)

2.2 Maadoitukselle asetetut vaatimukset

Maadoitusjärjestelmien rakenteelle on asetettu neljä vaatimusta:

- riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
- suurimman vikavirran kestävyys termisesti
- omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
- henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen.

Mitoituksen kannalta tärkeimmät tekijät ovat vikavirtojen arvot ja kestoajat sekä maaperän ominaisuudet. Mikäli asennuksessa on eri jännitetasoja, jokaisen suurjännitejärjestelmän on täytettävä edellä mainitut neljä vaatimusta. Näitä vaatimuksia ei kuitenkaan edellytetä työskentely- ja erotuspaikoilla tehtävillä työmaadoituksilla. (SFS 2001.)

2.2.1 Käyttöönotto- ja määräaikaismittaukset

Maadoitusresistanssi on mitattava ennen järjestelmän käyttöönottoa sekä määräajoin tehtävissä tarkastuksissa, kun maadoitusresistanssille on määrätty suurin sallittu arvo. Suurin sallittu arvo saadaan laskettua maasulkuvirran, sen kestoajan ja kosketusjännitteiden avulla. (STUL 2007.)

Uusien järjestelmien maadoitusvastus on mitattava ennen käyttöönottoa mahdollisuuksien mukaan. Mikäli mittaus ei ole mahdollista roudan takia, voidaan mittaus suorittaa korkeintaan vuoden kuluttua käyttöönotosta, jos pienjänniteverkon johtohaarojen ja liittymien maadoitukset on pääosin tehty.

Määräajoin tehtävien järjestelmien mittausväli on suunniteltava tapauskohtaisesti huomioiden yrityksen laadunvarmistusjärjestelmän vaatimukset, kokemusperäiset tiedot korroosion esiintymisestä, maaperän ominaisuudet ja maadoitusten rakenteen muuttuminen. Standardin SFS 6001 suosittelemat mittausvälien ohjearvot ovat:

- 6 vuotta, kun maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa
- 12 vuotta, kun maadoitus on useamman kuin yhden maadoitusjohtimen varassa. (SFS 2001.)

Laajaan maadoitusjärjestelmään liitettävän uuden järjestelmän maadoitusresistanssia ei tarvitse mitata, vaan järjestelmiä yhdistävien maadoitusjohtimien galvaninen yhteys on varmistettava. Myöskään määräaikaistarkastuksia tai -mittauksia ei edellytetä laajassa maadoitusverkossa. Jokaisen järjestelmän tulee liittyä vähintään kahdella tai kolmella yhteydellä laajaan maadoitusjärjestelmään. Yhteyksiä muodostuu sekä pien- että suurjännitejärjestelmien johtimien välityksellä. (Energiateollisuus.)

Käsin ohjattavilla pylväserotinasemilla, joille on tehty potentiaaliohjausrenkas sekä tyvi- tai sauvamaadoitus, ei tarvitse tehdä mittausta, vaan potentiaaliohjausrenkaan eheyden toteaminen riittää. Kaukokäyttöerotinasemia, joissa on omakäyttömuuntaja, koskevat maadoitusjännitevaatimukset, mikä edellyttää maadoitusten mittaamista. (Energiateollisuus.)

2.3 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssilla tarkoitetaan järjestelmän maadoituselektrodin ja referenssimaan välistä resistanssia. Referenssimaan sähköiseksi potentiaaliksi on sovittu nolla. Näin ollen maadoitusresistanssiin vaikuttavat maaperän resistiivisyys ja maata vasten kosketuksissa olevan maadoituselektrodin pinta-ala. Elektrodin pituudella on suurempi merkitys maadoitusresistanssin arvoon kuin sen poikkipinnalla. (SFS 2001.)

Elektrodin kenttäkuvan ollessa symmetrinen voidaan kahden pisteen välinen potentiaaliero laskea yhtälöllä 2.1.

$$U_1 - U_2 = \int_1^2 \frac{\rho \cdot I}{A(s)} ds \quad (2.1)$$

missä

ρ = maaperän resistiivisyys

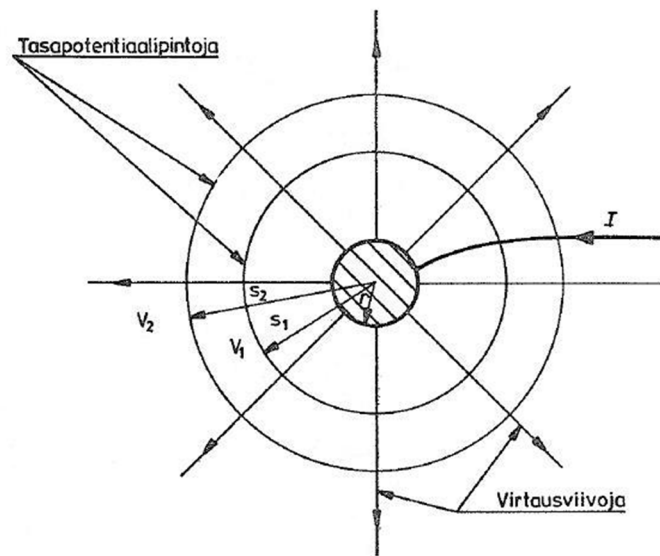
I = maadoituselektrodin kautta kulkeva virta

$A(s)$ = maadoituselektrodin pinta-ala.

Elektrodin potentiaali saadaan yhtälön 2.1 avulla vertaamalla elektrodin pinnan ja referenssimaan välistä potentiaaliero, jolloin integroinnin alarajaksi tulee elektrodin säde r ja ylärajaksi ääretön. Vastaavasti voidaan laskea esimerkiksi askeljännite kahden pisteen välillä etäisyydellä 1 ja 2 elektrodin keskipisteestä. (Valjus 1979.)

2.3.1 Palloelektrodi joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa

Palloelektrodi joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa muodostaa kuvan 2.1 mukaisesti s_1 ja s_2 säteisiä symmetrisiä tasapotentiaalipintoja etäisyyden funktiona elektrodin keskipisteeseen.



Kuva 2.1 Palloelektrodi joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa (Valjus 1979)

Tasapotentiaalipintojen ala A lasketaan yhtälöllä 2.2.

$$A = 4 \cdot \pi \cdot s^2 \quad (2.2)$$

missä

s = etäisyys elektrodin keskipisteestä.

Elektrodin potentiaali U ja maadoitusresistanssi R_E lasketaan yhtälöillä 2.3 ja 2.4 yhtälöitä 2.1 ja 2.2 hyväksikäyttäen, kun palloelektrodi sijaitsee maan pinnalla tai lähellä maan pintaa.

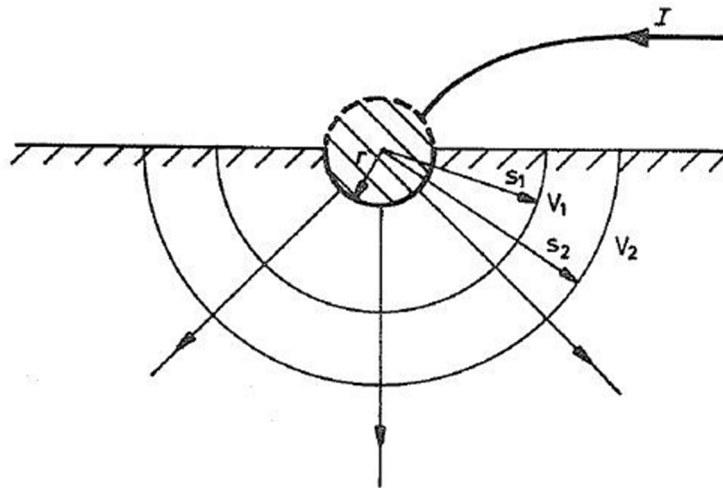
$$U = \int_r^{\infty} \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot s^2} ds = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.3)$$

$$R_E = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.4)$$

Luvun 2.3 yhtälöt pätevät maaperän ollessa homogeeninen, joka harvoin vastaa oikeita maadoitusolosuhteita. (Valjus 1979.)

2.3.2 Palloelektrodi maan pinnassa

Puoliksi maahan upotettu palloelektrodi on yhteydessä maahan keskipisteen tasosta, jolloin maata vasten oleva pinta-ala on puolet joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa olevasta palloelektrodista ilman ollessa eriste. Näin elektrodin jännite- ja maadoitusresistanssiyhtälöt ovat kaksi kertaa suurempia kuin luvussa 2.3.1. Kuva 2.2 havainnollistaa kyseistä tilannetta.



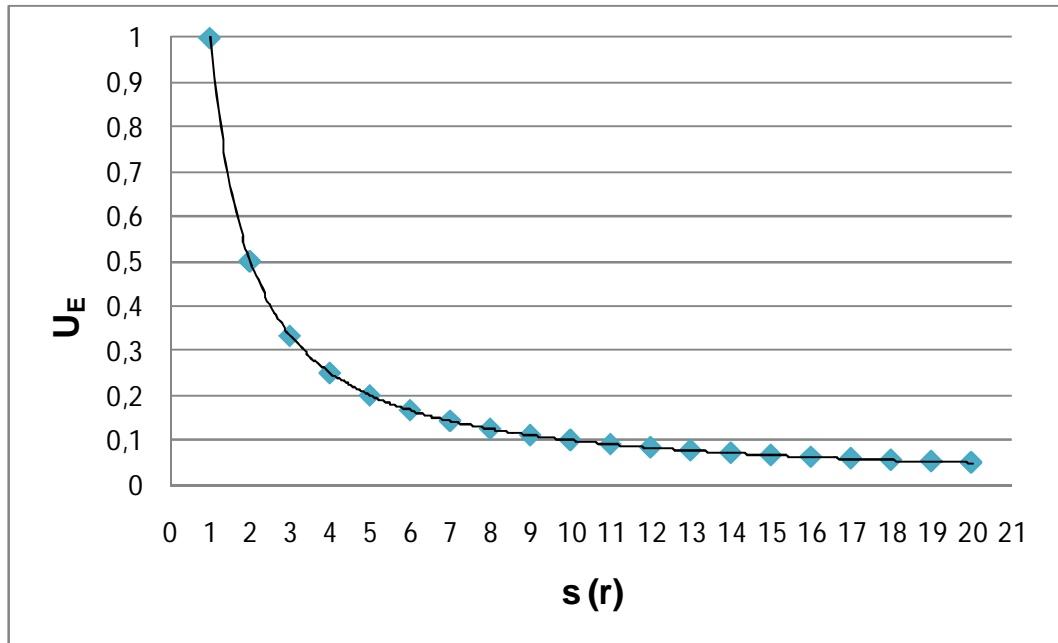
Kuva 2.2 Palloelektrodi maan pinnassa (Valjus 1979)

Elektrodin potentiaali U ja maadoitusresistanssi R_E saadaan yhtälöistä 2.5 ja 2.6.

$$U = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.5)$$

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.6)$$

Puoliksi maahan upotetun palloelektrodin jännitesuppilo saadaan laskettua yhtälöllä 2.5 vaihtelemalla etäisyyttä elektrodin keskipisteestä välillä $r - \infty$. (Valjus 1979.) Kuvaajassa 1 on esitetty suhteellinen maadoitusjännite etäisyyden funktiona elektrodista välillä $r - 20r$.

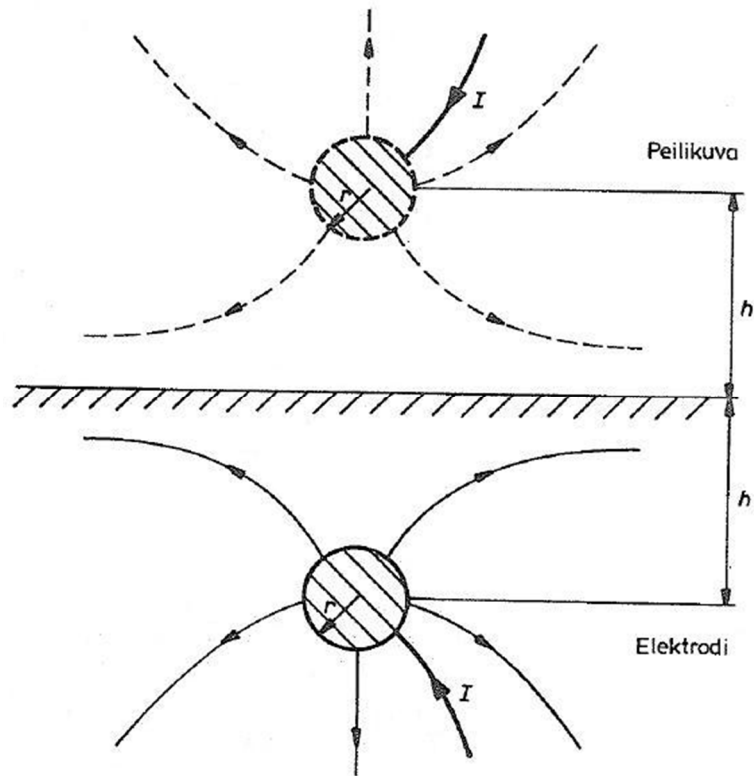


Kuvaaja 2.1 Maadoitusjännite etäisyyden funktiona elektrodista

Piste (1,1) vastaa elektrodin pinnan ja referenssimaan välistä potentiaaliero ja pisteiden kautta piirretty verhoikäyrä maadoituselektrodin jännitesuppilon muotoa.

2.3.3 Palloelektrodi tiettyyn syvyyteen upotettuna

Tiettyyn syvyyteen upotetun palloelektrodin maadoitusresistanssi ja jännitesuppilon muoto saadaan selville ns. peilikuvamenetelmän avulla. Virran kulkiessa elektrodista maan pintaa kohti, kääntyy se lähellä maan pintaa pinnan suuntaiseksi, jolloin jännitesuppilon voidaan ajatella muodostuvan kahdesta vastakkaisesta virtauksesta, jotka ovat toistensa peilikuvia. Kuvassa 2.3 on esitetty kyseinen tilanne, jossa r on elektrodin säde ja h upotussyvyys elektrodin keskipisteestä.



Kuva 2.3 Palloelektrodi tiettyyn syvyyteen upotettuna (Valjus 1979)

Palloelektrodin potentiaali U_1 joka suuntaan jatkuvassa homogeenisessä väliaineessa voidaan laskea yhtälöllä 2.7, kun upotussyvyys on huomattavasti suurempi kuin elektrodin säde. Elektrodin peilikuvan potentiaali U_2 saadaan yhtälöllä 2.8.

$$U_1 = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (2.7)$$

$$U_2 = \frac{\rho I}{4\pi \cdot 2h} \quad (2.8)$$

Elektrodin kokonaispotentiaali U_{kok} on yhtälöiden 2.7 ja 2.8 summa, joka saadaan yhtälöllä 2.9.

$$U_{\text{kok}} = U_1 + U_2 = \frac{\rho I}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2h} \right) \quad (2.9)$$

Jännitesuppilon muoto saadaan yhtälöllä 2.10, jossa s on tutkittavan pisteen etäisyys elektrodista maan pinnan tasossa ja maadoitusresistanssi R_E yhtälöllä 2.11.

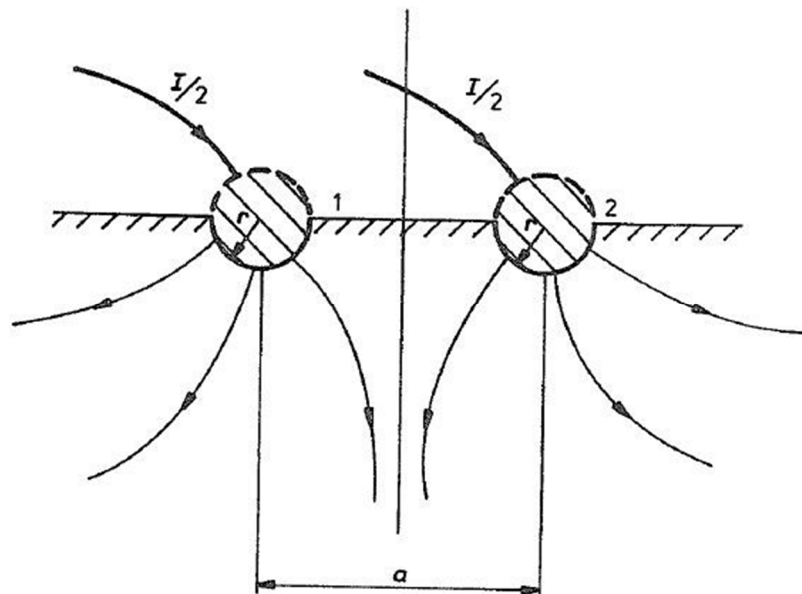
$$U_s = \frac{\rho I}{2\pi\sqrt{h^2 + s^2}} \quad (2.10)$$

$$R_E = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2h} \right) \quad (2.11)$$

Yhtälöstä 2.10 nähdään, että upotussyvyyden kasvaessa maadoitusjännitteen arvot pienenevät, mutta jännitesuppilon muotoon se vaikuttaa vain elektrodin läheisyydessä. (Valjus 1979.)

2.3.4 Kaksi samanlaista palloelektrodia maan pinnassa

Kahden identtisen maan pintaan asennetun palloelektrodin tapauksessa virta jakautuu kahden elektrodin kesken, jota esittää kuva 2.4.



Kuva 2.4 Kaksi palloelektrodia maan pinnassa (Valjus 1979)

Palloelektrodin 1 potentiaali U_{11} maan pinnalla voidaan laskea yhtälöllä 2.12, kun elektrodien keskipisteiden välinen etäisyys on huomattavasti sädettä suurempi.

$$U_{11} = \frac{\rho I / 2}{2\pi r} \quad (2.12)$$

Elektrodin 2 aiheuttama potentiaali U_{12} elektrodin 1 pinnalla saadaan yhtälöllä 2.13.

$$U_{12} = \frac{\rho I / 2}{2\pi a} \quad (2.13)$$

Elektrodin 1 kokonaispotentiaali U_{kok} on yhtälöiden 2.12 ja 2.13 summa, joka määritetään yhtälöllä 2.14.

$$U_{\text{kok}} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right) \quad (2.14)$$

Jännitesuppilon muoto saadaan yhtälöllä 2.15, jossa s_1 on pisteen etäisyys maan pinnan tasossa elektrodista 1 ja s_2 elektrodista 2.

$$U_s = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) \quad (2.15)$$

Maadoitusresistanssin R_E arvo saadaan laskettua yhtälöllä 2.16. Symmetrian takia elektrodin 2 kokonaispotentiaali $U_2 = U_1$.

$$R_E = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right) \quad (2.16)$$

Yhtälöstä 2.15 nähdään, että tarkastelupisteen etäisyyksillä s_1 ja s_2 ei ole kovin suurta merkitystä jännitesuppilon muotoon maadoituselektrodin läheisyydessä. (Valjus 1979.)

2.3.5 Erityyppisten maadoituselektrodien laskentakaavoja

Maadoituksissa käytetään erimuotoisia ja -kokoisia elektrodeita asennuskohteen olosuhteista riippuen. Erityyppisten elektrodien maadoitusresistanssit voidaan laskea taulukon 2.1 avulla, missä L on maadoituselektrodin pituus, D pallon, levyn tai verkon halkaisija, d köysimaadoituselektrodin halkaisija tai puolet nauhaelektrodin leveydestä, s levyelektrodin paksuus, ρ_E maaperän resistiivisyys ja h elektrodin upotussyvyys.

Taulukko 2.1 Maadoitusresistanssin laskentakaavoja (SFS 2001)

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Verkko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

Taulukon 2.2 avulla voidaan määrittää erityyppisten elektrodien jännitesuppiloiden muoto. Upotussyvyys vaikuttaa jännitesuppilon muotoon vain maadoituselektrodin lähialueella. Mikäli elektrodin potentiaalia tarkastellaan lähialueen ulkopuolella, voidaan erilaisten elektrodien jännitesuppilo määrittää hyvällä tarkkuudella maan pinnassa sijaitsevan palloelektrodin avulla. (Valjus 1979.)

Taulukko 2.2 Eri elektrodien jännitesuppiloiden laskentakaavoja (Valjus 1979)

Elektrodin laatu	Elektrodin poikki- tai halkiteikkaus	Elektrodi päältä	Yhtälö
Suora johdin pinnassa			$V_s = \frac{\rho I}{\pi L} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + s^2} + \frac{L}{2}}{s}$ $s \gg r$
Suora johdin upotettuna			$V_s = \frac{\rho I}{\pi L} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + s^2 + h^2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{s^2 + h^2}}$
Pystysuora putki pinnassa			$V_s = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + s^2} + L}{s}$ $s \gg r$
Levyelektrodi pinnassa			$V_s = \frac{\rho I}{\pi D} \arcsin \frac{D}{2s}$ $s \gg D/2$

Taulukossa 2.3 on laskettu samanpituisten elektrodien maadoitusresistanssien suhde suoran johtimen resistanssiin.

Taulukko 2.3. Samalla johdinpituudella saavutettavan maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen resistanssiin (SFS 2001)

Elektrodin pituus L (m)	20	60	200	600
Elektrodin muoto	Maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin			
	100	100	100	100
0,2 m 2 m 20 m	133 109 92	144 123 98	155 135 109	159 143 119
	103	103	102	102
	107	106	106	105
	116	115	114	112
	136	135	132	129
	159	158	154	148
	109	108	107	106

Taulukosta 2.3 nähdään, että suoralla maadoituselektrodilla saavutetaan parempi maadoitusresistanssi kuin useammasta johdinsäikeestä koostuvalla elektrodilla. Pientaajuisella virralla, kuten sähkönjakeluverkon tapauksessa maadoituselektrodin ulottuvuudella, on suuri merkitys saavutettavaan maadoitusarvoon. (Valjus 1979.)

2.3.6 Maaperän resistiivisyys

Maaperän ominaisvastuksella eli resistiivisyydellä ρ on suuri merkitys maadoitusresistanssin arvoon. Se ilmoittaa yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssin pituusyksikköä kohti. Maaperän resistiivisyys voi vaihdella merkittävästi pienellä alueella, mikä saattaa vaikeuttaa maadoituksen suunnittelemista ja mitoittamista. Maaperän resistiivisyyteen vaikuttavat:

- maalaji
- maalajin tiiviys
- raesuuruus ja sen jakautuma
- maan kosteuspitoisuus
- maan sisältämään veteen liuenneiden suolojen kemiallinen koostumus
- lämpötila (Nieminen 1979.)

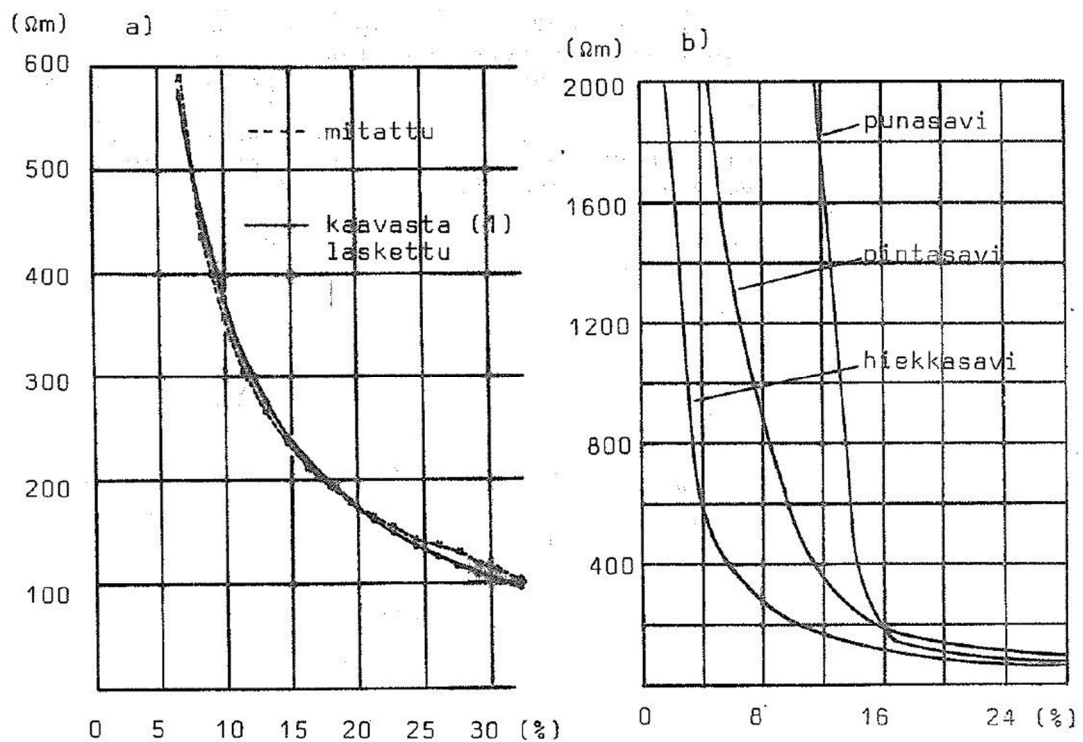
Taulukon 2.4 avulla voidaan vertailla eri maalajien välisiä resistiivisyseroja.

Taulukko 2.4 Maalajien, betonin ja veden resistiivisyydet (SFS 2001)

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2000	1000...3000
Moreenisora	3000	1000...10000
Harjusora	15000	3000...30000
Graniittikallio	20000	10000...50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10000	2000...100000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Nähdään, että vaihteluvälit ovat melko laajat. Suurimmat tekijät tähän ovat maalajin kosteuspitoisuus ja sen sisältämän veden resistiivisyys.

Kuvaajassa 2.2 on esitetty soraisen hiekkamaan (a) ja eri savilajien (b) resistiivisyys kosteuspitoisuuden funktiona.



Kuvaaja 2.2 Soraisen hiekkamaan a) ja savilajien b) resistiivisyys kosteuspitoisuuden funktiona (Nieminen 1979)

Kuvaajasta voidaan nähdä kosteuspitoisuuden merkittävä vaikutus maan resistiivisyyteen. Verrattaessa soraisen hiekkamaan ja savilajien välisiä kuvaajia huomataan, että savilajien resistiivisyys muuttuu aluksi hyvin jyrkästi, muttei olennaisesti tietyn pisteen jälkeen. Soraisella hiekkamaalla muutos on huomattavasti pienempää. Tämä johtuu eri maalajien kyvystä sitoa kosteutta itseensä.

Lämpötilan vaikutus maan sisältämän veden resistiivisyyteen on melko pieni yli $+2^{\circ}C$:n lämpötiloissa. Veden jäätyessä resistiivisyys kasvaa jyrkästi routarajan yläpuolisissa osissa. (Nieminen 1979.)

Maaperän resistiivisyys voidaan määrittää esimerkiksi Wenner-menetelmän avulla, jossa käytetään neljää elektrodia. Maan resistiivisyys saadaan laskettua

ulompien elektrodien kautta kulkevan virran ja sisempien elektrodien välillä vaikuttavan jännitteen avulla. Tätä menetelmää voidaan käyttää myös kaksikerrosmaan tapauksessa, jossa maan katsotaan muodostuvan kahdesta päällekkäisestä eri resistiivisyyden omaavasta kerroksesta. Tämä ajattelutapa on yleistynyt sillä saavutettavan paremman tarkkuuden ansiosta. (Nieminen 1979.)

Maaperän resistiivisyydellä on merkittävä rooli maadoitusten suunnittelussa. Siksi maaperämittauksia voidaan käyttää apuna erityisesti silloin, kun maaperän ominaisuuksista ei ole tarkempaa tietoa. (Nieminen 1979.)

2.4 Maadoitusjärjestelmien rakenne

Maadoituksia käytetään suojaustarkoituksiin ja häiriöiden estämiseen. Joskus maadoitukselta vaadittavat asiat saattavat kuitenkin olla jopa toisensa poissulkevia. Turvallisuusnäkökohdat ovat kuitenkin aina ensisijaisia.

Maadoitusjärjestelmissä käytetään säteittäistä ja verkkomaista rakennetta. Säteittäisessä maadoitusjärjestelmässä pyritään välttämään eri laitteistojen kautta muodostuvia silmukoita, joten sillä on suurempi merkitys häiriöiden estämisessä. Verkkomaisen maadoitusjärjestelmän käyttämiseen sähköjakelussa pyritään sillä saavutettavien turvallisuus- ja taloudellisuustekijöiden takia. (STUL 2007.)

2.4.1 Verkkomainen maadoitusjärjestelmä

Verkkomainen eli laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu useamman muuntopiirin yhdistyessä toisiinsa vähintään kahdella tai kolmella yhteydellä. Sen tarkoitus on muodostaa tasapotentiaalipinta järjestelmään kytkettyjen osien välille. Yhteyksiä toisiin muuntopiireihin syntyy sekä pien- että suurjänniteverkon välityksellä. Näin varmistetaan, ettei yksittäinen maadoitusjohdin vaurio katkaise yhteyttä laajaan maadoitusverkkoon. Verkkomaisella maadoitusjärjestelmällä saavutetaan edellä mainituista seikoista johtuen pienet maadoitusarvot. Verkkomainen maadoitusjärjestelmä syntyy usein tiheään asutuilla ja rakennetuilla alueilla. (STUL 2007; Energiateollisuus.)

2.4.2 Suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteinen maadoitus

Suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteisessä maadoituksessa suurjänniteverkon suojamaadoitus yhdistetään galvaanisesti pienjänniteverkon tähtipisteeseen. Yhdistetyllä maadoituksella estetään jänniterasituksen syntyminen muuntajan suojamaadoitettujen osien ja pienjännitepuolen välille sekä pienjännitevaiheen ja suojamaadoituksen välisen eristysvian aiheuttama potentiaalinnousu (Nikander 1994, 6). Sen käyttöä suositellaan aina, kun standardissa SFS 6001 määritetyt vaatimukset täyttyvät. Suurjänniteasennuksessa tapahtuvan maasulun aikana pienjännitejakeluverkossa tai siihen liitetyissä sähkön käyttäjän laitteistoissa ei saa esiintyä vaarallisia kosketusjännitteitä, eikä sähkön käyttäjän pienjännitteisessä laitteistossa esiintyvä pienjännitejärjestelmän tähtipisteen potentiaalinnoususta johtuva käyttötajuisen rasitusjännitteen suuruus saa ylittää sallittuja arvoja. Nämä ehdot täyttyvät, jos suurjänniteasennuksen maadoitusjärjestelmä yhdistetään laajaan maadoitusjärjestelmään tai maadoitusjännite U_E saa pienempiä tai yhtä suuria arvoja kuin järjestelmän maadoitusrakenteen ja vikavirran kestoajan perusteella saadut ehdot edellyttävät. (STUL 2007.) Maadoitus- ja kosketusjännitemitoitus on selitetty laajemmin luvussa 2.5.4.

Pylväsmuuntamoilla käytettäessä yhteistä maadoitusta suurjännitteen suojamaadoitusjohtimeen kytketään kaikki suojattavat osat, kuten muuntaja, pylväserottimen runko, mahdollinen orsi ja harukset. Suur- ja pienjännitejärjestelmien välinen yhteys muodostuu muuntajan tähtipisteen ja suojamaadoitusjohtimen välisellä haaralla. Myös mahdolliset potentiaalinohjauselektrodit liitetään johtavasti samaan järjestelmään. (STUL 2007.)

Puistomuuntamoissa suurjännitekaapeleiden keskusköydet, päätteet ja kojeiston kennot muodostavat yhtenäisen piirin. Pienjännitejärjestelmä yhdistyy suurjännitejärjestelmään maadoituskiskon, muuntajan tähtipisteen ja kannen sekä pienjännitekeskuksen välisillä johtimilla. Maadoituskiskoon liitetään maadoituselektrodit ja potentiaalintasausjohtimet sekä kaikki muut maadoitettavat osat. (STUL 2007.)

2.5 Maadoituksen suunnittelu- ja mitoitusperusteet

Maadoituksen suunnittelun lähtökohtana on riittävän suojaustason saavuttaminen. Maadoitusjännitteen suuruus on riippuvainen maadoituselektrodin kautta maahan kulkeman maasulkuvirran arvosta ja maaperän resistiivisyydestä. Näin ollen mitoituksen kannalta olennaista ovat vikavirrat ja maaperän ominaisuudet. Mikäli maadoitusolosuhteet ovat suotuisat, eivät maadoituskustannukset kasva suuriksi suhteessa verkon muihin rakennuskustannuksiin. Suomessa kuitenkin maaperän ominaisuudet, kuten maalaji ja sen epähomogeenisuus nostavat kustannuksia vaadittavan maadoitusarvon saavuttamiseksi. (Patja 1979.)

2.5.1 Elektrodin rakenne

Maadoituselektrodin sopivuus kohteeseen riippuu maaperän ominaisuuksista. Yleisimmin käytetty rakenne huonoissa maadoitusolosuhteissa on vaakaelektrodi, koska yleensä maan pintakerros on johtavinta. Se asennetaan usein kaapeliin tai aurataan maahan routarajan yläpuolelle. Talvisin maadoitusresistanssit ovat suurempia kuin kesäisin muun muassa maan sisältämän veden jäätyminen takia. Tämä on huomioitava niin, että suojausvaatimukset täytyvät myös roudan aikana. Pitkillä vaakamaadoituksilla maadoituksen kannalta on merkitsevää maadoitusimpedanssin arvo, joka voidaan laskea esimerkiksi siirtojohdon yhtälöiden mukaisesti (Valjus 1979.)

Pystyelektrodien käyttöä suosii sillä saavutettavan maadoitusresistanssin stabiilius. Pystyelektrodi asennetaan osin routarajan alapuolelle, jolloin routa ei pääse vaikuttamaan maadoitusresistanssin arvoon vaakamaadoituksen tavoin. Niitä käytetään usein, jos tiedetään maan resistiivisyyden pieneneminen syvemällä. Tavallisesti käytetään eri rakenteiden yhdistelmiä, jolloin yhdistetään niillä saavutettavat edut. (STUL 2007.)

2.5.2 Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys

Maan kanssa kosketuksissa olevat maadoituselektrodit ovat alttiina korroosiolle sekä mekaanisille voimille asennuksen ja käytön aikana (STUL 2007, 37). Tämä asettaa tiettyjä rajoituksia käytettäville materiaaleille ja niiden mitoitukselle. Erityisesti on huomioitava eri metallien välinen galvaaninen korroosio. Liitteessä 1 on taulukoitu maadoituselektrodien vähimmäismitat eri materiaaleilla ja elektrodityypeillä. Yleisesti käytetyllä paljaalla kupariköydellä tai -johtimella suositeltu vähimmäispoikkipinta-ala on 25 mm^2 . Teräksestä valmistettu elektrodi pitää päällystää tai käsitellä paremman korroosionkeston saavuttamiseksi.

Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinnat, joita suositellaan käytettäväksi myös potentiaalintasausjohtimien mitoittamisessa, ovat:

- kupari	16 mm^2
- alumiini	35 mm^2
- teräs	50 mm^2

Myös teräksestä valmistetut maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimet on suojattava korroosiolta. (SFS 2001.)

2.5.3 Terminen lujuus

Termisen mitoituksen lähtökohtana on maadoitusjärjestelmän kautta kulkeva virta, jonka arvo määräytyy käytetyn järjestelmän rakenteesta liitteen 2 taulukon mukaisesti. Keski-jänniteverkoissa käytetään maasta erotettua ja sammutettua järjestelmää, joissa maadoitusjohdin mitoitetaan kaksoismaasulkuvirran I''_{KEE} mukaan, kun maasulun kokonaiskesto-aika on yli 1 s. Tätä lyhyemmillä ajoilla voidaan käyttää maasta erotetussa järjestelmässä kapasitiivista maasulkuvirtaa I_C ja sammutetussa järjestelmässä maasulun jäännösvirtaa I_{Res} . Maadoituselektrodille riittävät luvun 2.5.2 mukaiset vähimmäispoikkipinta-alat. Maavirran I_E laskemiseen käytetään reduktiokerrointa r , joka ottaa huomioon ukkosjohtimien ja maakaapelien metallivaippoja pitkin kulkevat virrat maasulun aikana. (SFS 2001.) Ukkosjohtimilla estetään vaihejohtimiin osuvat salamaniskut ja niistä aiheutuneet syöksyaallot 400 kV:n ja 220 kV:n johdoilla ja lähes kaikilla 110

kV:n johdoilla (Pyrhönen 1992, 8). Keskijänniteverkossa ei kuitenkaan käytetä ukkosjohtimia huonojen maadoitusolosuhteiden takia (Aura ym. 1993, 224).

Maadoitusjohtimen tai -elektrodin poikkipinta-ala alle 5 s kestäväillä vikavirroilla voidaan laskea yhtälöllä 2.17.

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (2.17)$$

missä

A = poikkipinta-ala (mm²)

I = johtimen virran tehollisarvo (A)

t = vikavirran kestoaika (s)

K = virrallisen osan materiaalista riippuva vakio

β = virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0°C

θ_i = alkulämpötila (°C)

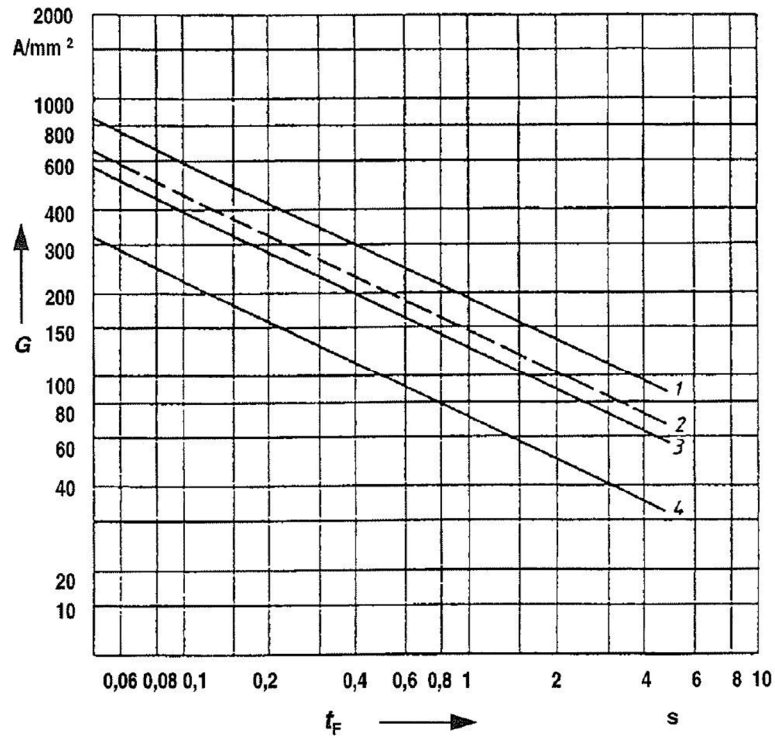
θ_f = loppulämpötila (°C). (SFS 2001)

Yhtälön 2.17 vakiot β ja K eri materiaaleille saadaan taulukosta 2.5.

Taulukko 2.5 Materiaalista riippuvien vakioiden arvot (SFS 2001)

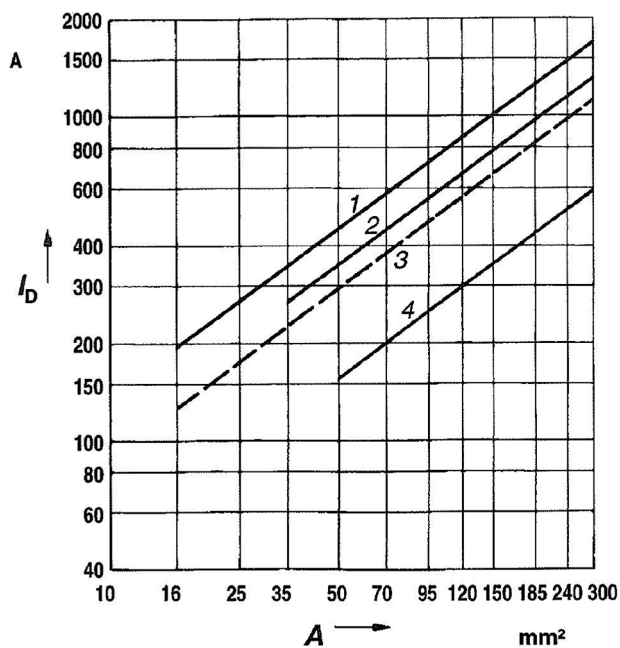
Materiaali	β (°C)	K (A·√s/mm ²)
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Normaalisti alkulämpötilana käytetään 20 °C ja loppulämpötilana 300 °C, jolloin voidaan käyttää kuvaajan 2.3 arvoja, jossa suora 1 pätee paljaalle tai sinkkipäällysteiselle kuparille, suora 2 tinatulle tai lyijyvaipalliselle kuparille loppulämpötilan ollessa 150 °C, suora 3 alumiiniselle maadoitusjohtimelle ja suora 4 sinkkilyllylle teräkselle.



Kuvaaja 2.3 Maadoitusjohtimien ja –elektrodien oikosulkuvirran tiheys G vikavirran kestoajan t_f funktiona (SFS 2001)

Mikäli vikavirta kestää yli 5 s, saadaan poikkipinnat kuvaajan 2.4 avulla, jossa maadoitusjohtimen jatkuva virta I_D on esitetty poikkipinnan A funktiona samoilla materiaaleilla kuin kuvaajassa 2.3.



Kuvaaja 2.4 Poikkipinnaltaan pyöreään maadoitusjohtimen jatkuva virta I_D poikkipinnan A funktiona (SFS 2001)

Loppulämpötilana materiaaleilla on 300 °C paitsi tinatulla tai lyijyvaipallisella kuparilla 150 °C. Jos loppulämpötilana halutaan käyttää muita arvoja, saadaan muunnoskerroimet taulukosta 2.6.

Taulukko 2.6 Muunnoskerroimet jatkuvan virran loppulämpötilasta 300 °C muuhun lämpötilaan (SFS 2001)

Loppulämpötila (°C)	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

Alempia loppulämpötiloja suositellaan esimerkiksi eristetyille johtimille niiden huonompien jäähtymisominaisuuksien takia. (SFS 2001.)

2.5.4 Sallitut maadoitus- ja kosketusjännitteet

Kosketusjännite muodostuu, kun henkilö koskettaa maadoitusjärjestelmän osaan kädellä vian aikana. Tällöin virtapiiri muodostuu käden ja jalkojen kautta maahan. Askeljännitteessä piiri muodostuu henkilön maahan kosketuksissa olevien jalkojen välille. Molemmissa tapauksissa virta syntyy eri pisteiden potentiaalierojen takia. Kosketusjännitteen sallitut arvot on määritetty SFS 6001-standardissa. Kosketusjännite ei saa ylittää arvoa, jolla sydän joutuu vaaralliseen kammiovärinänsä (Lakervi ym. 2008, 182). Suurimmat sallitut maadoitusjännitteet saadaan yhtälöllä 2.18.

$$U_E = I_E \cdot R_E \leq k \cdot U_{TP} \quad (2.18)$$

missä

U_E = maadoitusjännite

I_E = maavirta

R_E = maadoitusresistanssi

k = rakennetekijän määräävä kerroin

U_{TP} = kosketusjännite.

SFS 6001 -standardi määrittelee maavirran maadoitusimpedanssin kautta maahan siirtyvänä virtana, joka on osa maasulkuvirtaa ja maasulkuvirran päävirtapiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin kulkevana virtana. Keski-jänniteverkko on ukkosjohtimeton, joten maavirtana käytetään maasulkuvirtaa.

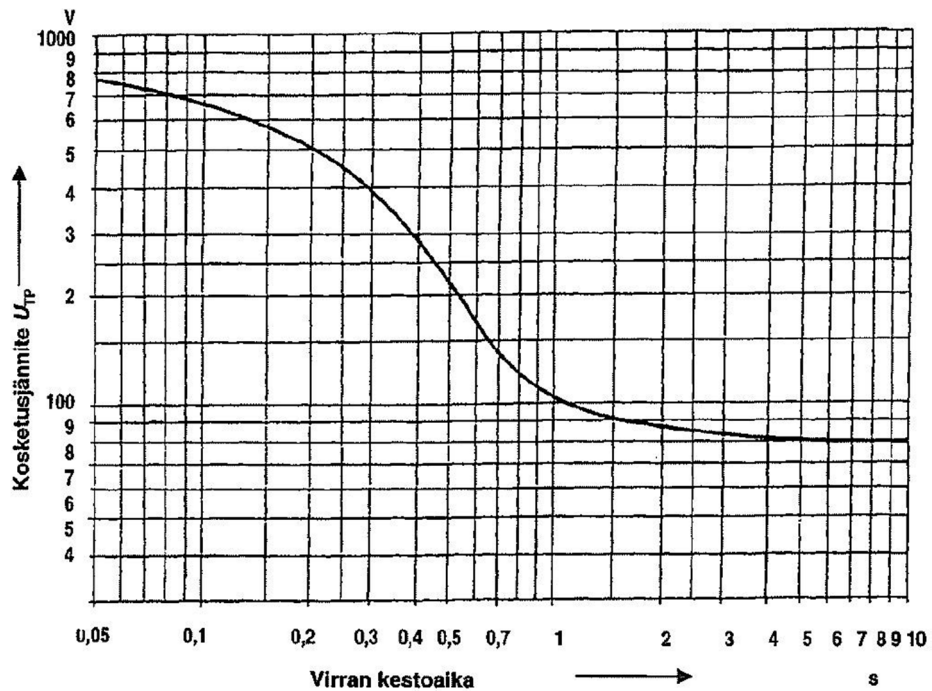
Jos yhtälö 2.18 ratkaistaan R_E :n suhteen, nähdään että virran kaksinkertaistuksessa maadoitusvastuksen arvo puolittuu, kun virran kestoaika pysyy samana. Kerroin k saa taulukon 2.7 mukaisia arvoja eri tilanteissa maadoitusten lukumäärästä ja sijainnista riippuen, jotka määräävät osaltaan sallitun maadoitusjännitteen U_E arvon.

Taulukko 2.7 Yhteisen maadoituksen käyttö (SFS 2001)

Kerroin	Maadoitus	U_E
1	Pj-maadoitus vain muuntamolla	$\leq U_{TP}$
2	Maadoitus muuntamolla ja jokaisella yli 200 metriä pitkällä johtohaaralla sekä liittymissä	$\leq 2U_{TP}$
4	Jos kertoimella 2 saatua arvoa ei voida teknillisistä tai taloudellisista syistä saavuttaa.	$\leq 4U_{TP}$
5	Kun maadoitusolosuhteet ovat erittäin huonot ja muuntopiiri on hyvin suppea.	$\leq 5U_{TP}$

Ehtoa $U_E \leq 4U_{TP}$ voidaan käyttää, kun muuntamolla on potentiaalinhojaus ja jokaisessa pj-verkon haarassa on tehty vähintään yksi johtohaaran maadoitus. Ehdon $U_E \leq 5U_{TP}$ käyttö on sallittua, kun maaperä on huonosti johtavaa ja kaikissa pj-liittymissä on maadoituselektrodi, jonka liittämistä rakennuksen pääpotentiaalintasausjärjestelmään suositellaan. Tällöin myös kertoimen 4 ehtojen tulee täyttyä. (SFS 2001.)

Sallittu kosketusjännite U_{TP} saadaan vikavirran kestoajan avulla kuvaajan 2.5 mukaisesti. Pitkillä virran kestoajoilla voidaan U_{TP} :lle käyttää arvoa 75 V.



Kuvaajassa 2.5 Sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmässä. (SFS 2001)

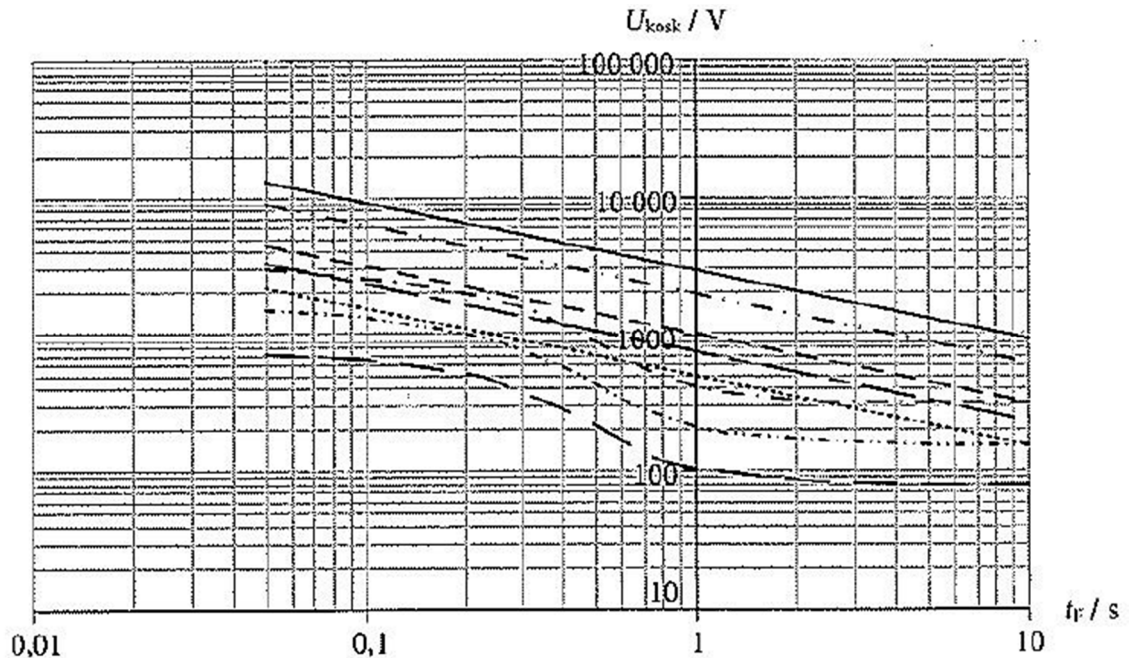
Kuvaajan 2.5 arvojen lukemisen helpottamiseksi ja tulkintaerojen vähentämiseksi on tehty taulukko 2.8 sallituista kosketusjännitteistä laukaisuaian funktiona.

Taulukko 2.8 Suurimmat sallitut kosketusjännitteet (STUL 2007)

Laukaisuaika (s)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	5,0	10,0
Kosketusjännite (V)	390	290	215	160	132	120	110	102	85	80	80

Ennen vuotta 2001 SFS 6001 -standardin voimaantumista yli 1000 V:n järjestelmien maadoitusten kosketusjännitevaatimukset olivat olennaisilta osiltaan vuonna 1974 julkaistujen Sähköturvallisuusmääräysten mukaiset, joissa laitteistot tai niiden osat oli jaettu eri ryhmiin maadoitusjännitteestä aiheutuvan kosketusjännitteen vaarallisuuden perusteella. Sallittujen maadoitusjännitteiden arvoihin vaikuttivat käyttöjännite ja se, kuinka usein ja kuinka todennäköisesti ihmisiä liikkui kohteen läheisyydessä. Yli 110 kV:n järjestelmässä kytkinlaitoksille sallittiin kaksinkertaiset ja johdoille kolminkertaiset maadoitusjännitteet alle 110 kV:n järjestelmään verrattuna johtojen usein sijaitessa harvaan asutuilla alueilla. SFS 6001 -standardissa verkon käyttöjännite ei vaikuta kosketusjännitevaati-

muksiin (Elovaara ym. 2011b). Kuvaajassa 2.6 on esitetty StM:n julkaisun A1-93 ja SFS 6001:n kosketusjännitteiden vertailu. (Sähkötarkastuslaitos ry 1974; SFS 2001.)



Kuvaaja 2.6 A1-93:n (suorat) ja SFS 6001:n (käyrät) kosketusjännitevaatimusten vertailu maasulun keston t_f funktiona (Elovaara ym. 2011b)

Alin käyrä on U_{TP} :n arvo kertoimella 1 ja seuraavat kertoimella 2 ja 4. Suorat kuvaavat maadoitusjännitteen riippuvuutta maasulun ajasta t_f ja ovat muotoa $U_{maad} = U_0/\sqrt{t_f}$, jossa U_0 saa arvot 500 V, 750V, 1000 V, 2000 V ja 3000 V järjestyksessä alhaalta ylös. SFS 6001 -standardiin siirtyminen on tiukentanut kosketusjännitevaatimuksia, vaikkakin osa käyrästöjen välisistä eroista johtuu siitä, että maadoitusjännitteestä vain osa esiintyy kosketusjännitteenä. (Elovaara ym. 2011b.)

3 MAASULKU

Maasululla tarkoitetaan jännitteisen osan ja maan tai maahan yhteydessä olevan osan välistä eristysvikaa. Tavallisesti maasulku syntyy jännitteisen johtimen ja maan välille vikavastusta pitkin. Suomessa keskijänniteverkon maasulkuvirrat

ovat tarkoituksellisesti pieniä, jotta vaaralliset kosketusjännitteet saadaan pidettyä pieninä. (Lakervi ym. 2008, 182; Nikander 1994.)

Tavallisin maasulkuvika on yksivaiheinen maasulku, jossa jännitteisen vaiheen ja maan välillä on yhteys esimerkiksi linjaan nojaavaa puuta pitkin. Muita maasulkuvikoja ovat kaksivaiheinen maaosulku, kaksoismaasulku ja johdinkatkeama, jossa yksivaiheinen maasulku on kuorman puolella.

Kaksivaiheinen maaosulku syntyy, kun kaksi vaihetta on oikosulussa ja yhteydessä maahan. Vikavaiheiden virrat kasvavat moninkertaisiksi normaalitilaan verrattuna. (Lakervi ym. 2008; Nikander 1994.)

Kaksoismaasulussa kaksi vaihetta on kosketuksissa maahan verkon eri kohdissa. Usein kyseinen tilanne syntyy yksivaiheisen maasulun aikana nousseiden jännitteiden seurauksena, kun eristystaso ylittyy viallisissa komponenteissa. (Nikander 1994.)

Johdinkatkeamaan liittyy hyvin usein yksivaiheinen maasulku. Johdinkatkeaman aikaiseen maasulkuvirtaan ja nollajännitteeseen vaikuttaa hyvin paljon se, koskettaako johdin maata syötön vai kuorman puolelta. Jos johdin koskettaa maata kuorman puolella maasulkuvirta ja nollajännite pienenevät merkittävästi. (Nikander 1994.)

3.1 Maasulusta aiheutuneet keskeytykset

Sähkönjakeluverkkoliiketoimintaa valvoo Energiamarkkinavirasto. Sen tarkoituksena on huomioida kaikkien sidosryhmien tarpeet muun muassa estämällä verkkoyhtiöiden monopoliaseman väärinkäyttö ja takaamalla asiakkaille hyvälaatuista sähköä kohtuulliseen hintaan. Nykyisenkaltaista valvontaa on tehty vuodesta 2005, jolloin siirryttiin osin etukäteiseen valvontaan. Valvontamallia pyritään kehittämään ja parantamaan jatkuvasti, mikä lisäisi erityisesti valvontamallin ennakoitavuutta verkkoyhtiöiden kannalta, helpottaisi verkonarvon määrittystä ja ohjaisi voimakkaammin laadun parantamiseen. (Honkapuro 2010.)

Sähkökäyttäjille keskeytyksestä aiheutuvaa taloudellisesta haittaa kuvataan KAH-arvolla, joka ilmoittaa rahamääräisen arvon teho- tai energiayksikköä kohti eri keskeytystyypeillä. EMV käyttää valvontamallissaan valtakunnallisia energiajakaumalla painotettuja arvoja, mikä ei huomioi eri asiakasryhmiä. Tämä vaikuttaa osaltaan siihen, ettei malli kannusta parantamaan tiettyjen asiakasryhmien tarpeita esimerkiksi investointien muodossa. Tulevaisuudessa siirryttäneen asiakasryhmäkohtaisiin KAH-arvoihin, mikä helpottaa investointien kohdentamista oikeisiin paikkoihin. KAH-arvojen määrittämiseksi on tehty useita tutkimuksia, jotta arvo kuvaisi mahdollisimman tarkasti kunkin käyttäjäryhmän kokemien keskeytysten haittoja. Tuoreimmassa vuonna 2005 valmistuneessa Teknillisen korkeakoulun ja Tampereen teknillisen yliopiston yhteistyönä tekemässä tutkimuksessa KAH-arvoja määritettiin asiakaskyselyjen avulla. (Järventausta 2003; Silvast 2005.) Taulukossa 3.1 on esitetty asiakasryhmäkohtaiset ja EMV:n valvontamallin KAH-arvot eri keskeytystyypeillä.

Taulukko 3.1 Asiakasryhmäkohtaiset ja EMV:n valvontamallin KAH-arvot (Paranen 2010; EMV 2007)

Asiakasryhmä	Odottamaton keskeytys		Suunniteltu keskeytys		PJK	AJK
	€/kW	€/kWh	€/kW	€/kWh	€/kW	€/kW
Kotitalous	0,36	4,29	0,19	2,21	0,11	0,48
Maatalous	0,45	9,38	0,23	4,80	0,20	0,62
Teollisuus	3,52	24,45	1,38	11,47	2,19	2,87
Julkinen	1,89	15,08	1,33	7,35	1,49	2,34
Palvelu	2,65	29,89	0,22	22,82	1,31	2,44
EMV	1,1	11,0	0,5	6,8	0,55	1,1

Taulukosta nähdään, että jo jälleenkytkentöjen aiheuttamat tuotantokeskeytykset ovat erityisen haitallisia teollisuudelle. Myös julkisen ja palvelusektorin kuluksen kokemat keskeytyshaitat ovat huomattavasti suurempia kuin koti- ja maatalouden vastaavat arvot. Eri asiakasryhmien kokemien keskeytyshaittojen eroavaisuuksien takia EMV:n valvontamalli antaa keskeytyksen haitalle joko liian suuren tai pienen arvon asiakasryhmästä riippuen.

Keskeytyksistä aiheutuneen haitan rahallinen arvo saadaan laskettua yhtälöllä 3.1 taulukon 3.1 EMV:n KAH-arvoja käyttämällä.

$$KAH_{t,k} = \left(\begin{array}{l} KA_{odott,t} \cdot h_{E,odott} + KM_{odott,t} \cdot h_{W,odott} + \\ KA_{suunn,t} \cdot h_{E,suunn} + KM_{suunn,t} \cdot h_{W,suunn} + \\ AJK_t \cdot h_{ajk} + PJK_t \cdot h_{pjk} \end{array} \right) \cdot \left(\frac{W_t}{T_t} \right) \cdot (1 + \Delta RKI_k) \quad (3.1)$$

missä

$KAH_{t,k}$ = Toteutunut sähkötoimituksen keskeytyksistä verkonhaltijan asiakkaille aiheutunut haitta (keskeytyskustannus) vuonna t vuoden k rahanarvossa.

$KA_{odott,t}$ = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon odottamattomista keskeytyksistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysaika vuonna t, tunti.

$h_{E,odott}$ = Odottamattomista keskeytyksistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kWh vuoden 2005 rahanarvossa.

$KM_{odott,t}$ = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon odottamattomista keskeytyksistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysmäärä vuonna t, kpl.

$h_{W,odott}$ = Odottamattomista keskeytyksistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kW vuoden 2005 rahanarvossa.

$KA_{suunn,t}$ = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon suunnitelluista keskeytyksistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysaika vuonna t, tunti.

$h_{E,suunn}$ = Suunnitelluista keskeytyksistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kWh vuoden 2005 rahanarvossa.

$KM_{suunn,t}$ = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon suunnitelluista keskeytyksistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysmäärä vuonna t, kpl.

$h_{W,suunn}$ = Suunnitelluista keskeytyksistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kW vuoden 2005 rahanarvossa.

AJK_t = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon aikajälkeenkytkennöistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysmäärä vuonna t, kpl.

- h_{ajk} = Aikajälleenkytkennöistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kW vuoden 2005 rahanarvossa.
- PJK_t = Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen 1 – 70 kV:n verkon pikajälleenkytkennöistä aiheutunut vuosienenergiolla painotettu keskeytysmäärä vuonna t, kpl.
- h_{pjk} = Pikajälleenkytkennöistä asiakkaalle aiheutuneen haitan hinta €/kW vuoden 2005 rahanarvossa.
- W_t = Verkonhaltijan verkosta 0,4 kV:n ja 1 – 70 kV:n jännitteillä käyttäjille luovutettu energiamäärä vuonna t, kWh.
- T_t = Vuoden t tuntien lukumäärä.
- ΔRKI_k = Rakennuskustannusindeksin muutos vuodelle k. (EMV 2007)

Rakennuskustannusindeksin muutos vuodelle k lasketaan kaavalla 3.2.

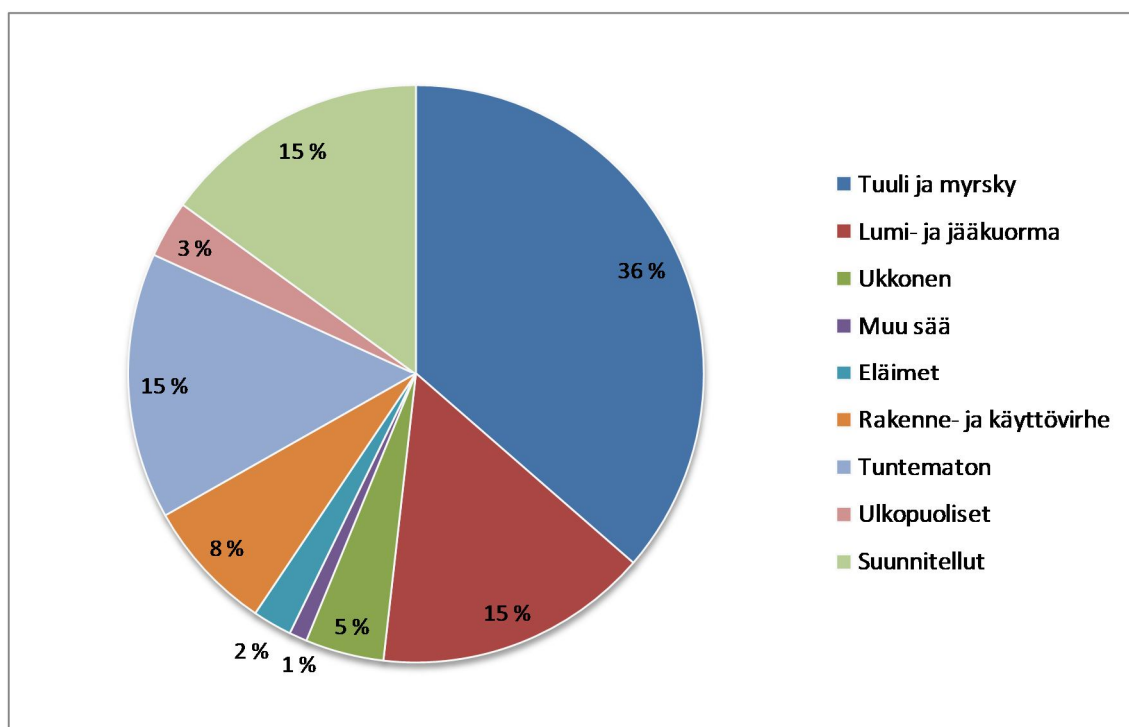
$$\Delta RKI_k = \frac{RKI_{k-1}}{RKI_{2004}} - 1 \quad (3.2)$$

missä

- RKI_k = Rakennuskustannusindeksin (1995=100) huhti-kesäkuun indeksilukujen keskiarvo vuonna k. (EMV 2007)

Suurin osa keskijänniteviioista johtuu ilmajohtoverkkojen ohimenevistä valokaarivioista, joille altteimpia ovat avojohdot. Näiden usein maasulusta johtuvien viokojen poistamiseksi käytetään pika- ja aikajälleenkytkentöjä. Pikajälleenkytkennässä johto tehdään lyhyeksi aikaa (1 s) ja aikajälleenkytkennässä lyhyehköksi aikaa (1 – 180 s) jännitteettömäksi, jolloin valokaari sammuu eikä aiheuta pidempää keskeytysaikaa. (Nikander 1994.) Pidempi maasulusta johtuva keskeytys voi aiheutua esimerkiksi johtoon nojaavasta puusta. Taulukosta 3.1 nähdään, että jälleenkytkentöjen merkitys on kohtuullisen pieni verrattuna odottamattomiin keskeytyksiin. Pitkät keskeytykset ovatkin keskeisiä, koska toimitusvarmuus määräytyy ensisijaisesti niiden perusteella, eikä jälleenkytkentöjen määrää kannata vähentää pidempien keskeytysten kustannuksella (Järventausta 2003).

Energiateollisuus ry:n julkaisemien keskijänniteverkon keskeytysten aiheuttajien vuosien 2005 - 2009 keskiarvot on esitetty kuvaajassa 3.1.



Kuvaaja 3.1 Keskeytysten aiheuttajien viiden vuoden keskiarvo (Energiateollisuus 2010)

Suunnittelemattomien keskeytysten osuus oli 85 %. Niiden suurimmat aiheuttajat olivat tuuli ja myrsky. Pelkästään luonnonilmiöistä johtuvat keskeytykset kattoivat yli puolet kaikista häiriöistä. Näiden tietojen pohjalta nähdään, että maasulkuvikoja vähentämällä vaikutetaan myös sähkön toimitusvarmuuteen erityisesti jälleenkytkentöjen osalta.

3.2 Keskijänniteverkon maadoitustapa

Keskijänniteverkon maadoitustavalla voidaan vaikuttaa muun muassa maasulkuvirran arvoon ja edelleen turvallisuuteen. Suomessa käytetään huonoista maadoitusolosuhteista johtuen maasta erotettua ja sammutettua maadoitustapaa eli verkko on käyttömaadoittamaton (Lakervi ym. 2008). Energiateollisuuden keskeytystilastojen mukaan vuonna 2009 keskijänniteverkosta hieman yli puolet oli osittain tai täysin sammutettu. Tulevaisuudessa Suomessa sammutte-

tun keskijänniteverkon käyttö luultavasti lisääntyy muun muassa tiukentuneiden maadoitusjännitevaatimusten takia (Nikander 1994).

Maasulkukerroin k kuvaa maasulun aikaisen terveen vaiheen suurimman vaihejännitteen ja normaalin vaihejännitteen suhdetta. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa kerroin on suurimmillaan noin 1,8. Verkkoa sanotaan tehollisesti maadoitetuksi, kun $k \leq 1,4$. Suomessa 400 kV:n ja 220 kV:n kantaverkot ovat tehollisesti maadoitettuja ylijännite- ja relesuojauksen suunnittelun takia (Fingrid 2007). Maasulkukertoimen arvon määräävät symmetristen komponenttien keskinäiset suhteet. Muuntajan tähtipisteen maadoittamisella ja kuristimen reaktanssilla voidaan vaikuttaa piirin reaktanssisuhteeseen ja edelleen maasulkukertoimen arvoon. (Aro ym. 1996; Elovaara ym. 2011a.)

3.2.1 Maasta erotettu keskijänniteverkko

Maasta erotetussa verkossa sähköaseman päämuuntajan toision tähtipiste ei ole galvanisesti yhteydessä maahan. Tällöin maasulkuvirta kulkee mahdollisen vikavastuksen, johdinten maakapasitanssien, vaihejohtojen impedanssien kautta muuntajan käämityksiin ja sieltä takaisin vikapaikkaan (Lakervi ym. 2008). Vaikka maasta erotetussa verkossa maasulkuvirrat ovat melko pieniä, suuret maadoitusjännitteet aiheuttavat tarpeen pienentää maasulkuvirtoja ennestään.

3.2.2 Sammutettu keskijänniteverkko

Sammutetussa keskijänniteverkossa muuntajan toision tähtipisteen ja maan väliin kytketään induktiivinen kela, jonka reaktanssi vastaa johtojen muodostamaa kapasitiivista reaktanssia. Maasulussa johdinten maakapasitanssien ja kelan induktanssin läpi kulkevat virrat ovat vastakkaisuuntaiset, jolloin maasulkuvirta ja vikapaikan jännite pienenevät. Tällä vaikutetaan suotuisasti turvallisuustekijöihin kosketusjännitteiden laskiessa. (Lakervi ym. 2008.)

Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti sijoittamalla kuristin sähköasemalla tai hajauttamalla asentamalla kompensointiyksiköitä eri puolille verkkoa, jolloin investointikustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Tyypillisesti kompen-

sointi tehdään keskitetysti, koska kuristimien säätöominaisuudet ja suoritusarvot mahdollistavat jatkuvan säädön verkon kytkentätilanteiden mukaan. (Nikander 1994.)

Kompensoinnilla voidaan vähentää merkittävästi jälleenkytkentöjen (erityisesti pj:en) määrää, koska valokaarien syttymis- ja sammumisolosuhteet ovat suotuisemmat verrattuna maasta erotettuun verkkoon. Täysin kompensoidussa verkossa pj:en määrä voi pudota jopa 80 – 90 % (Järventausta 2003). Tästä aiheutuneet seurannaisvaikutukset, kuten katkaisijoiden kulumisen ja huollon tarpeen väheneminen sekä suojakipinävälien käytön tehostuminen, puoltavat kompensoinnin käyttöä. (Mörsky 1992; Nikander 1994.)

Huonoja puolia kompensoinnissa ovat muun muassa tarve muuttaa releasette-
luja kompensoinnin ollessa pois käytöstä, liian suuresta kapasitanssiepäsym-
metriasta aiheutuva normaalitilan liian suuri nollajännite ja suuri-impedanssisten
vikojen laukaisemisen vaikeutuminen. (Nikander 1994.)

3.3 Maasulkuvirta

Yksivaiheisen maasulun aikana maadoittamattoman verkon vikavirta on huomattavasti pienempi kuin oikosulussa. Kaikissa maasulkutapauksissa viat ovat epäsymmetrisiä, jolloin laskennassa pitää käyttää symmetrisiä komponentteja. Maasulkuvirran I_f suuruuteen vaikuttavat galvaanisesti yhteen kytketyn keski-jänniteverkon pituus, mahdollinen vikavastus ja verkon maadoitustapa. Näin ollen maasulkuvirtaa voidaan rajoittaa kompensoinnilla, jakamalla sähköase-
man johtolähdöt toisen päämuuntajan kesken tai maadoittamalla viallinen vaihe sähköasemalla, jolloin suurin osa vikavirrasta kulkee pieni-impedanssista reittiä pitkin ja valokaaren sammuminen vikakohtassa nopeutuu. Maasulkupaikalla ei ole huomattavaa merkitystä maasulkuvirran arvoon (Mörsky 1992). (Nikander 1994; Aro 1996; Lakervi ym. 2008.)

Normaalitilassa johdinten maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa on nolla. Kun verkkoa ei ole maadoitettu, vikavirtapiiri muodostuu johdinten maakapasitanssien ja muuntajan kautta vikapaikkaan, jolloin vikavaiheen va-

rausvirta ja jännite pienenevät ja terveissä vaiheissa kasvavat. (Mörsky 1992.) Maasulkuvirta on suoraan verrannollinen maakapasitanssiin, minkä takia johdintajilla on suuri merkitys maasulkuvirran arvoon. Maakaapeleilla on huomattavasti suuremmat maakapasitanssit kuin ilmajohdoilla pienistä johtimien välisistä etäisyyksistä johtuen. Kaapelien kapasitanssiin vaikuttaa merkittävästi myös käytetyn eristeaineen suhteellinen permittiivisyysarvo (Pyrhönen 1993, 13). Yksivaiheisen vikaresistanssittoman maasulkuvirran likiarvokaava antaa kaapeliverkolle 60-kertaisen arvon verrattuna ilmajohtoverkkoon. Osittain tästä syystä kaapeliverkkojen alueilla käytetään laajaa maadoitusverkkoa tiukempien maadoitusjännitevaatimusten takia.

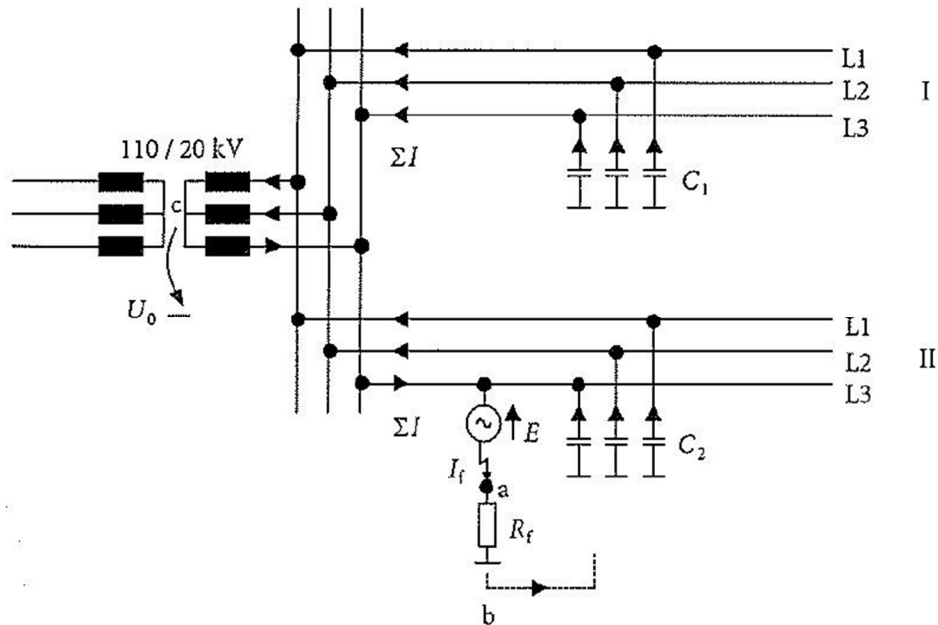
3.3.1 Maasulun aikaiset muutosilmiöt

Maasulun alkuvaiheessa tapahtuvat virtojen ja jännitteiden muutosilmiöt eli transientit vaikuttavat merkittävästi verkon hetkellisiin arvoihin. Maasulun aikana viallisen vaiheen varaus purkautuu värähdellen maasulkukohtaan ja johdon päiden välillä ja terveiden vaiheiden varaukset kasvavat, joissa varausvirran värähtely näkyy myös jännitteissä. Terveiden vaiheiden varausvirtojen värähtelytaajuutta rajoittaa kuitenkin muuntaja. Jännitteiden ja virtojen taajuuteen ja amplitudiin vaikuttavat jännitteen hetkellisarvo vian alkuhetkellä, vikaresistanssi, vian etäisyys asemalta, verkon komponenttien resistanssit, kuormat ja pienjänniteverkko sekä mahdolliset resonanssit. Muutosilmiöt ovat melko samanlaisia maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa. Terveen vaiheen jännitehuippu voi olla jopa 2,5-kertainen normaalitilaan verrattuna, jos maasulku tapahtuu vaihejännitteen huippukohtassa. (Mörsky 1992; Nikander 1994.)

Eri vaiheiden varausvirtojen muutokset ja kyllästyneiden muuntajien magnetoisvirrat erityisesti maasta erotetussa verkossa lisäävät jännitteen yliaaltoja aiheuttaen vääristymiä käyrämuotoihin. Maasulkuvirta sisältää eniten viidettä (250 Hz) yliaaltoa. (Mörsky 1992.)

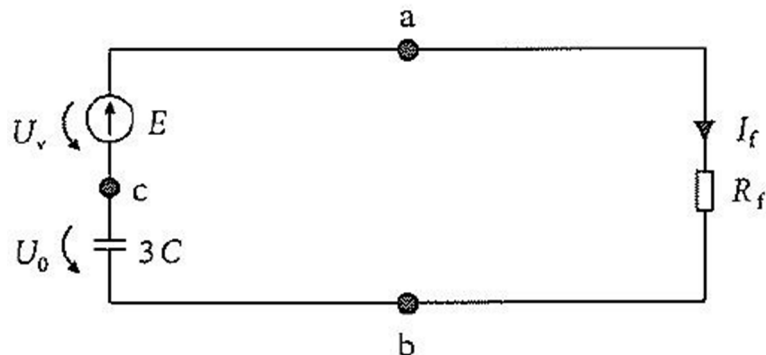
3.3.2 Yksivaiheinen maasulkuvirta erotetussa verkossa

Yksivaiheista maasulkua erotetussa verkossa esittää kuva 3.1. Asema syöttää kahta johtolähtöä, joista maasulku tapahtuu lähdössä II.



Kuva 3.1 Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa (Lakervi ym. 2008)

Vikavirtapiiri muodostuu vikapaikasta a maahan, maakapasitanssien kautta johtoihin ja muuntajan tähtipisteeseen c ja edelleen takaisin vikapaikkaan. Piiristä saadaan kuvan 3.2 mukainen Theveninin vastinpiiri. Edellä olevat yhtälöt eivät huomioi johtojen jännitehäviöitä tai alkuvaiheen transienteja.



Kuva 3.2 Maasta erotetun verkon sijaiskytkentä (Lakervi ym. 2008)

Kuvan 3.2 piirin impedanssi muodostuu vaiheiden maakapasitansseista $3C$ ja mahdollisesta vikavastuksesta R_f . Maasulkuvirran I_f arvo saadaan yhtälöllä 3.1 ja tähtipiste- eli nollajännitteen yhtälöllä 3.2.

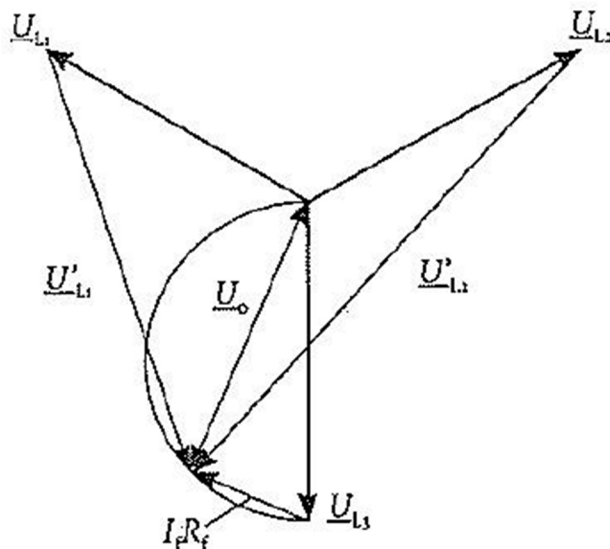
$$\bar{I}_f = \frac{\bar{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega CR_f} \bar{U}_v \quad (3.1)$$

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{j3\omega C} \cdot (-\bar{I}_f) = \frac{-1}{1 + j3\omega CR_f} \bar{U}_v \quad (3.2)$$

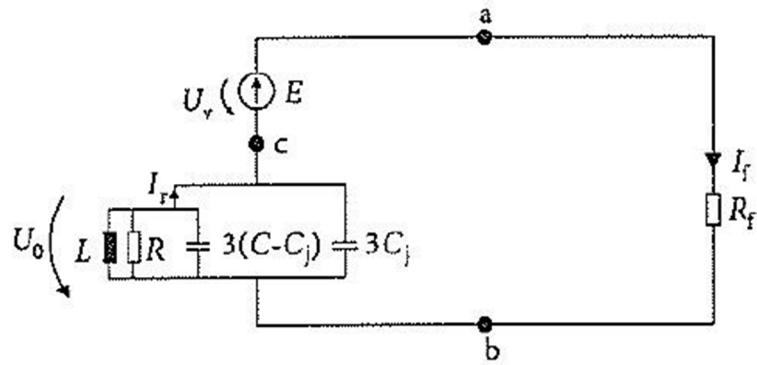
Näiden avulla maasulkuvirran ja nollajännitteen välinen yhteys saadaan yhtälöllä 3.3.

$$\bar{I}_f = -j\omega 3C \bar{U}_0 \quad (3.3)$$

Nähdään, että maasulkuvirta on nollajännitettä 90° jäljessä, jota havainnollistaa kuvassa 3.3 esitetyt jännitteiden ja virran osoittimet yksivaiheisessa maasulussa.



Kuva 3.3 Osoittimet yksivaiheisessa maasulussa (Lakervi ym. 2008)



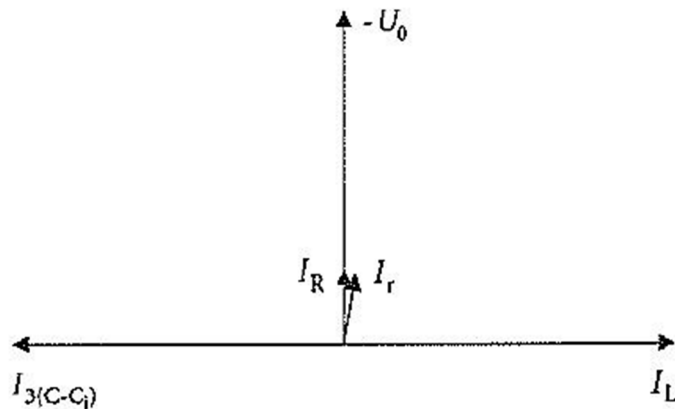
Kuva 3.5 Sammutetun verkon sijaiskytkentä (Lakervi ym. 2008)

Maasulkuvirta saadaan laskettua yhtälöllä 3.4 ja nollajännite yhtälöllä 3.5.

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{U}}{R_f + \frac{R}{1 + jR\left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)}} \quad (3.4)$$

$$\bar{U}_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f\left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)} \bar{U}_v \quad (3.5)$$

Sammutetussa verkossa virtojen ja nollajännitteen osoittimet ovat kuvan 3.6 mukaiset.



Kuva 3.6 Virta- ja nollajänniteosoittimet sammutetussa verkossa (Lakervi ym. 2008)

Täysin sammutetussa tilanteessa maasulkuvirran ja nollajännitteen välinen vaihesiirto on 180°. Yksivaiheisessa maasulussa nollajännite on paljon suurempi sammutetussa kuin erotetussa verkossa. Myös terveessä tilassa sammutetussa verkossa esiintyvää nollajännitettä voidaan pienentää tähtipistevastuksella tai johtimien vuorottelulla, jolla vaiheista tehdään sähköisesti samanarvoisia. (Mörsky 1992.)

3.4 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojauksen tarkoitus on estää kosketusjännitteiden esiintyminen maasulun aikana laukaisemalla viallinen lähtö syötöstä. Tavallisesti jokainen maasulku kytketään pois automaattisesti tai käsin, jolloin siitä on tultava hälytys verkon käytöstä vastaavalle henkilölle. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa keskijänniteverkoissa maasulkuvirta on kuitenkin niin pieni, että verkkoa voidaan käyttää vian aikana, jos maasulusta saadaan hälytys, valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni ja se sammuu itsestään. Muuntopiireissä, joissa käytetään yhdistettyä maadoitusta, maadoitusjännite leviää myös sähkönkäyttäjien pienjännitepuolelle muodostaen turvallisuusriskin. Nykyään käytetäänkin lähes poikkeuksetta laukaisevaa suojausta. (Nikander 1994; SFS 2001; Elovaara ym. 2011a.)

Maasulkusuojaus toteutetaan erityyppisillä releillä suojattavan verkon ominaisuuksista riippuen. Kun releen mittaussuure ylittää asetellun arvon, se havahtuu ja ollessaan tarpeeksi kauan havahtuneena antaa laukaisukäskyn katkaisijalle tai lähettää hälytyksen. (Elovaara ym. 2011b.) Jos vika ei häviä jälleenkytkentöjen jälkeen, ryhdytään toimenpiteisiin sähköjen palauttamiseksi.

3.4.1 Maasulkusuojauksen suunnittelu ja toteutus

Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa vikavirrat ovat pieniä, joten suojausta ei voi toteuttaa oikosulkusuojauksen tavoin. Se voi perustua käyttötaajuisten nollapiste- ja vaihejännitteiden sekä summavirtojen muutokseen, yliaaltoihin tai muutosilmiöihin, joita maasulku aiheuttaa. Suunnittelun kannalta ovat tärkeitä verkon maadoitustapa, suojaustapa, mittamuuntajien muuntosuhteet

sekä vikavirtojen suuruudet, joiden määrittämiseksi on tehtävä erilaisia mahdollisia varasyöttötilanteita, joilla haetaan pienimmät ja suurimmat arvot. Nykyään releet mahdollistavat porrastuksen, jolla suuri ja pienivirtaisille vioille voidaan käyttää eripituisia laukaisuaikoja. Aiemmin voimassa olleet sähköturvallisuusmääräykset edellyttivät, että maasulkusuojaus toimii vielä 500Ω vikaresistansseilla. Nykyinen SFS 6001 -standardi ei edellytä tätä, joskin releasettelut laskeaan käytännössä aina tämän ehdon mukaisesti (Lakervi ym. 2008; Elovaara II ym. 2011).

Hyvässä suojauksessa kaikki osat on suojattu jollain suojarieleellä ja suojaus on selektiivinen eli vain vikaantunut verkon osa irrotetaan muusta verkosta. Tämä asettaa tiettyjä rajoituksia maasulkusuojaukseen käytettäville releille. Esimerkiksi nollavirtarele mittaa terveiden vaiheiden kautta palaavaa virtaa viallisessa vaiheessa. Kytkentätilanteiden muutoksista aiheutuneet johtopituuksien muutokset sekä vikaresistanssin arvo vaikuttavat myös nollavirran suuruuteen. Tämä vaikeuttaa releen asettelua, eikä releellä voida tietyissä tilanteissa saavuttaa selektiivisyyttä edes vikaresistanssin ollessa nolla. (Nikander 1994; Elovaara II ym. 2011.)

Nykyisin käytettävät maasulkureleet ovat suuntareleitä, koska niillä saavutetaan hyvä herkkyys, selektiivisyys ja mittauskriteerien riippumattomuus toisistaan. Suuntareleet jaetaan tehonsuuntareleisiin ja vaihekulmasuuntareleisiin, joista jälkimmäinen on käytetympi. Vaihekulmasuuntareleen toiminta perustuu nollavirran I_0 ja -jännitteen U_0 sekä niiden välisen kulmaeron φ mittaukseen. Rele toimii, kun nollavirta ja -jännite ylittävät asetteluarvot sekä kulma φ on alueella $\varphi_0 - \Delta\varphi < \varphi \leq \varphi_0 + \Delta\varphi$. Kulman mittaamisella varmistetaan, että vikavaiheen nollavirtamuuntajan mittaaman virran suunta on vikapaikkaan eikä kiskostoon päin. Releasettelujen kannalta tärkeimpiä tekijöitä ovat pienimmät nollavirrat ja -jännitteet. (Mörsky 1992; Lakervi ym. 2008.)

Virtamittaus voidaan tehdä tarpeen mukaan joko summavirtamuuntajalla tai kaapelivirtamuuntajalla, jossa kaapeli toimii ensiönä. Summavirtamuuntajissa toision nimellisvirta on tyypillisesti 5 A, joten muuntosuhteeseen vaikuttaa maasulkuvirran suuruus. Nämä tekijät määrittävät releiden herkkyyden. Tästä syystä

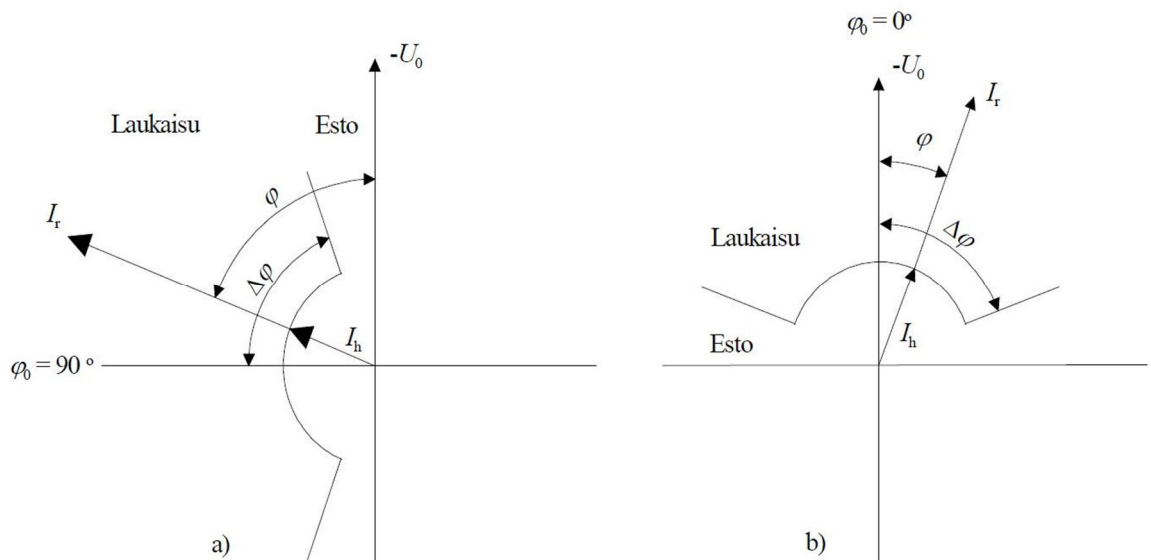
virtamuuntajien summakytkeä käytettäessä joudutaan muuntosuhteita suurentamaan kuormitus- tai oikosulkuvirtojen kasvaessa. Kaapelivirtamuuntajilla tätä ongelmaa ei ole. (Mörsky 1992; Lakervi ym. 2008.)

Nollajännitteen mittausta tehdään avokolmioon kytketyillä jännitemuuntajilla, joissa mitataan sarjaankytkettyjen käämien yli vaikuttavaa jännitettä. Tyypillisesti muuntosuhde mitoitetetaan niin, että vikaresistanssittomassa maasulussa avokolmiossa on 100 V:n jännite. (Lakervi ym. 2008.)

Suuntareilla on pieni toimintaviive, jonka tarkoitus on estää sen toimiminen, mikäli valokaari sammuu itsestään tai kompensoinnin ansiosta (Mörsky 1992).

3.4.2 Maasta erotetun ja sammutetun verkon suojausten eroavaisuudet

Suuntareilla toteutettu maasulkusuojaus maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa eroaa releen asetusarvojen osalta. Maasta erotetussa verkossa releissä käytetään lois- ja sammutetussa pätövirtakytkeä. Kuvassa 3.7 on esitetty vaihekulmasuuntareleen toiminta näissä tapauksissa.



Kuva 3.7 Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi maasta erotetussa a) ja sammutetussa verkossa b). (Lakervi ym. 2008).

Kuvassa I_h on releen asetettu havahtumisvirta. Molemmissa tapauksissa kulma φ noudattaa ehtoa $\varphi_0 - \Delta\varphi < \varphi \leq \varphi_0 + \Delta\varphi$. Maasta erotussa verkossa (a) virran I_0 tulee olla noin 90° edellä jännitettä $-U_0$, jolloin ehto on $90^\circ - \Delta\varphi < \varphi \leq 90^\circ + \Delta\varphi$. Toleranssilla $\Delta\varphi$ korjataan vuotovastusten ja johdinresistanssin vaikutusta. Mikäli relettä käytetään myös sammutetussa verkossa, toleranssin määräytyminen on epämääräisempää ja sillä on tyypillisesti melko suuri arvo.

Sammutetussa verkossa (b) $\varphi_0 = 0$, jolloin vaihekulma muodostuu pelkästään toleranssista $\Delta\varphi$. Sille annetaan tyypillisesti melko suuria arvoja resonanssitilanteen läheisyyden takia, jolloin kulmaero voi vaihdella merkittävästi. Kuvan tilanteissa $\Delta\varphi$:llä on suuret arvot. (Mörsky 1992.)

3.4.3 Maasulkusuojauksen haasteet

Kaksoismaasulut ja suuren vikaimpedanssin kautta tapahtuvat maasulut asettavat tiettyjä haasteita ja vaatimuksia maasulkusuojaukselle. Erityisesti jälkimmäinen on aiheuttanut tarpeen tutkia vikojen indikointimenetelmiä turvallisuuden lisäämiseksi ja taloudellisten haittojen vähentämiseksi. (Nikander 1994.)

Pienillä vikaimpedanssin arvoilla kaksoismaasulun virta saa oikosulkusuojan toimimaan, mutta sen laskeminen on vaikeaa, koska virta kulkee osan matkaa maassa hyvin johtavia kanavia, kuten putkia pitkin. Suurilla vikaimpedansseilla oikosulkusuojat eivät enää toimi. Kaksoismaasuluissa releasetteluilla ja ylijännitesuojien kunnolla voidaan vaikuttaa suojauksen luotettavuuteen ja haittojen minimointiin riippumatta siitä sijaitseeko vikapaikka samalla vai eri johdoilla. (Mörsky 1992; Lakervi ym. 2008.)

Suuren vikaimpedanssin kautta tapahtuvat maasulut ovat suojauksen ja havainnoinnin kannalta vaikein vikatyyppe, koska vikavirta voi olla kuormitusvirtaakin pienempi. Nollajännitettä mittaava rele toimii näissä tapauksissa vain, jos verkko on pieni ja johtimet kuormitettuja. Haasteellisimpia vikoja ovat johtoon nojaava kuiva puu sekä johdinkatkeama, jossa johtimen kuorman puoleinen pää on maakosketuksessa ja syötön puoleinen pää jää eristetyksi maasta. Samasta syystä myös PAS-johdon käytön lisääntyminen on lisännyt vaikeasti havaittavi-

en vikojen määrää, mikä osaltaan on luonut tarpeen kehittää vikojen ilmaisumenetelmiä. Muun muassa transienttien ja nollajännitteen ja -virran muutoksiin perustuvia vikojen indikointimenetelmiä on tutkittu paljon, mutta kaupallisia sovellutuksia ei toistaiseksi ole saatavilla. (Mörsky 1992; Nikander 1994; Lakervi ym. 2008.)

4 MAADOITUKSEN MITTAUSMENETELMÄT

Maadoitusten mittaamiseen on useita menetelmiä, joista käännepistemenetelmä on yleisimmin käytetty muuntopiirien maadoitusten mittaamiseen, koska se ei vaadi mitään erikoistoimenpiteitä tai käyttökeskeytyksiä. Periaatteena on, että mittaukset tehdään mahdollisimman tarkalla menetelmällä. Laajoissa keskijännitemaadoitusjärjestelmissä maadoituksen kunto voidaan todeta pihtimittarilla ja käsin ohjattavien pylväserotinasemien potentiaalinhjausrenkaan eheys tavallisella yleismittarilla. Voltti-ampeerimenetelmää hyödynnetään suurien maadoitusjärjestelmien mittaamisessa. (Energiateollisuus; STUL 2007.)

Sarjamittausmenetelmää on käytetty erityisesti määräaikaistarkastuksissa aikaisempien ohjeistusten mukaisesti. Nykyään sitä käytetään vain, kun suoja- ja käyttömaadoitukset ovat erillään. Tällöinkin on huomioitava, että se on epäluotettava menetelmä. Sarjamittauksessa avataan jokin maadoitus ja mitataan muut maadoitukset sarjassa sen kanssa, jolloin kuitenkin rikotaan standardin SFS 6001 määräyksiä, koska maadoitukset eivät ole mittauksen aikana normaalissa tilassa. (STUL 2007.)

Pihtimittauksessa mittari indusoi maadoitusjärjestelmään jännitteen, joka aikaansaa piirissä kulkevan virran. Näiden avulla mittari laskee maadoitusresistanssin arvon. Usein mittarilla on myös mahdollista mitata maadoitusjohtimessa kulkeva nollavirta. Pihtimittauksista voidaan hyödyntää laajojen maadoitusjärjestelmien kuntotarkastuksissa tai tiheästi maadoitettujen järjestelmien, kuten suurten rakennusten maalenkkien mittauksessa, mutta maadoitusvastuksen mit-

taamiseen se ei sovellu epäluotettavuuden takia. (Energiateollisuus, Chauvin Arnoux 2001b.)

4.1 Voltti-ampeerimenetelmä

Voltti-ampeerimenetelmällä pyritään jäljittelemään todellista maasulkutilannetta ja sitä käytetään laajojen maadoitusjärjestelmien, kuten 110 / 20 kV sähköasemien mittauksessa. Maadoitusimpedanssin itseisarvo Z_E saadaan yhtälöllä 4.1.

$$Z_E = \frac{U_{EM}}{I_M \cdot r} \quad (4.1)$$

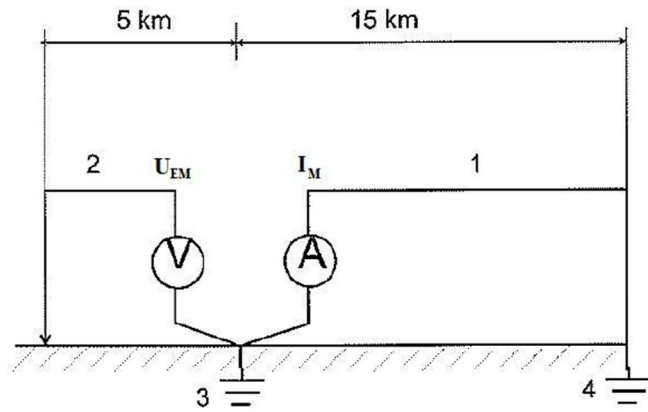
missä

U_{EM} = maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välinen jännite

I_M = mitattu testausvirta

r = reduktiokerroin, jolla huomioidaan ukkosjohtimien ja kaapeleiden vaikutus kertoimen saadessa yhdestä pienempiä arvoja. (SFS 2001)

Tavallisesti käyttötaajuinen mittausvirta syötetään avojohtoa pitkin maadoitukseen, josta se kulkee maata pitkin kaukana sijaitsevaan vastamaadoitukseen. Jännite mitataan apuelektrodin ja maadoituksen väliltä. Koska jänniteapuelektrodi sijaitsee kaukana molempien maadoituselektrodien vaikutusalueelta, on mitattu jännite suoraan maadoitusjännite. Kuvassa 4.1 on havainnollistettu mittauksen periaate. (SFS 2001; STUL 2007.)



- 1 virransyöttöjohto
- 2 jännitteen mittausjohdin
- 3 käyttömaadoituselektrodi
- 4 vastamaadoituksen elektrodi

Kuva 4.1 Voltti-ampeerimenetelmän periaate (STUL 2007)

Jänniteapuelektrodin ja maadoituksen väliseksi etäisyydeksi suositellaan vähintään viittä kilometriä. Mittausvirran suuruus tulisi olla yli 50 A, jotta häiriöjännitteet olisivat pienempiä kuin mitattava jännite. Voltti-ampeerimenetelmä vastaa hyvin oikeaa maasulkutilannetta, jolloin siitä saatava tulos poikkeaa myös mahdollisimman vähän todellisesta arvosta. (Energiateollisuus; STUL 2007.)

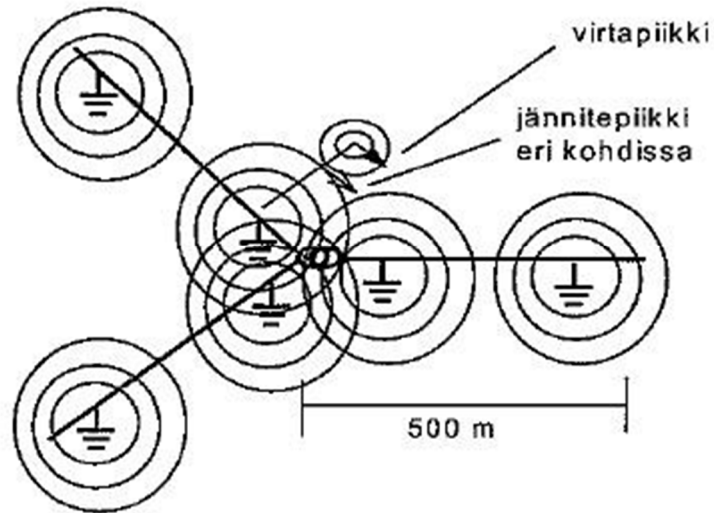
4.2 Käännepistemenetelmä

Muuntopiirien maadoitusvastusten mittaus tehdään tavallisesti käännepistemenetelmällä, jossa maadoitusresistanssin arvoja mitataan siihen tarkoitetulla mittarilla. Mittaustuloksista saaduista arvoista muodostetaan käyrä, josta järjestelmän maadoitusresistanssi luetaan. Mittauksia voivat tehdä myös siihen perehdytetyt henkilöt, jotka eivät ole sähkölaitos asentajia. (Energiateollisuus.)

4.2.1 Mittaaminen

Usein maadoitus toteutetaan vaakamaadoituksilla huonoista maadoitusolosuhteista johtuen. Elektrodit ovat tyypillisesti 50 m pitkiä. SFS 6001 -standardin mukaan apuelektrodin etäisyys mitattavasta elektrodista tulee olla vähintään nelinkertainen. Tästä johtuen usein käytetään 200 m pitkiä jänniteapuelektrodien johtimia. Näin varmistetaan, ettei mittaus tapahdu maadoituselektrodien po-

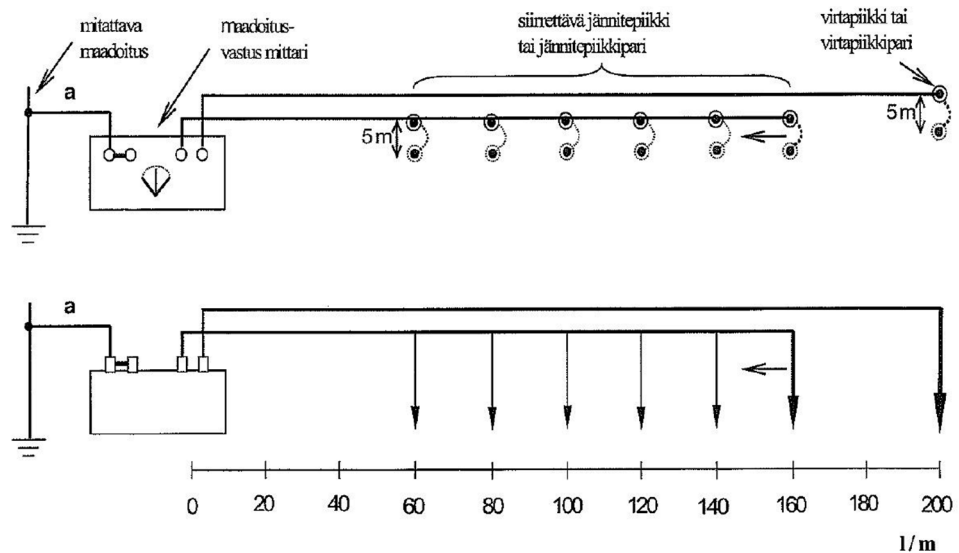
tentiaalintasausrenkaiden sisällä ja vaikuta mittaustulokseen. Kuva 4.2 havainnollistaa kyseistä tilannetta. (Energiateollisuus.)



Kuva 4.2 Maadoituselektrodien potentiaalintasausrenkaat (Energiateollisuus)

Käytännössä mittauksen suorittaminen muuntamolta niin, ettei se sivua tasausrenkaita on hankalaa, erityisesti jos maasto rajoittaa mittauspaiikkojen ja -suuntien valintaa. Mittaamista suositellaankin muuntopiirin keskustan alueelta, jossa maadoituksia on harvemmassa. (Energiateollisuus.)

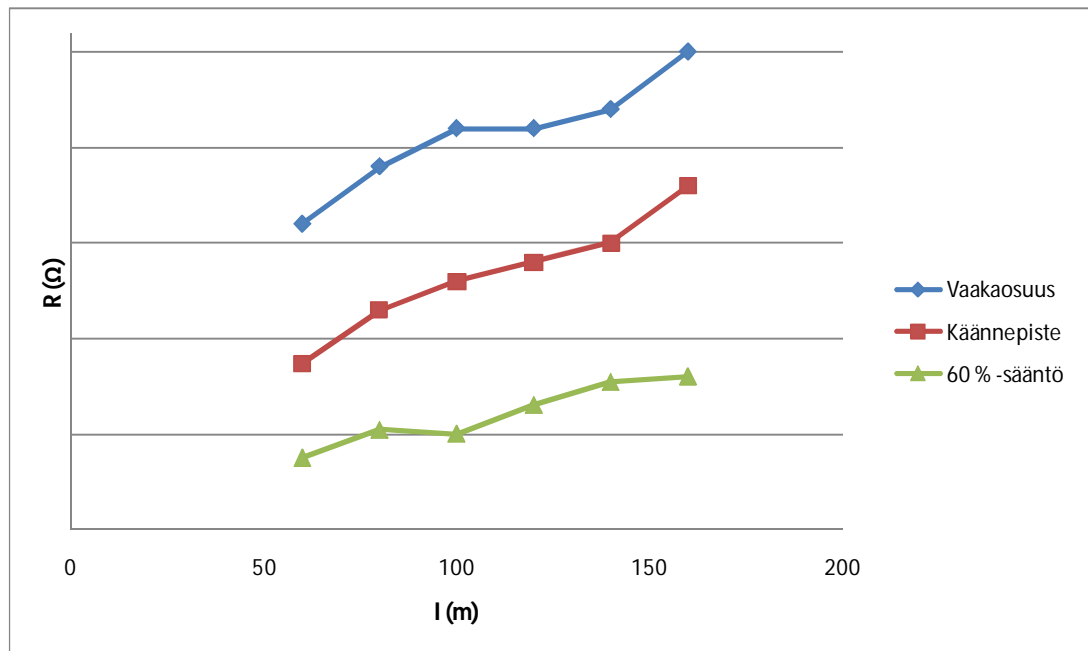
Mittaaminen tehdään erityisesti siihen tehdyllä mittalaitteella, joka syöttää maadoitukseen 100 – 500 V vaihtojännitettä, jonka taajuus on välillä 70 – 140 Hz poislukien verkkotaajuus ja sen kerrannaiset ja joka näyttää resistanssiarvon näytöllä. Mittari yhdistetään maadoitusjärjestelmään yhdysjohtimella, joka liitetään esimerkiksi maadoitusjohtimen routalenkkiin. Virta kulkee yhdysjohtimen ja maadoituselektrodin kautta maahan ja virta-apuelektrodia pitkin takaisin mittariin ja muodostaa jännitehäviön maan resistanssin vaikutuksesta, jota mitataan jänniteapuelektrodilla. Jänniteapuelektrodilla tullaan tietyn välimatkan välein takaisin mittarille päin ja mitatut lukemat kirjataan mittauspöytäkirjaan. (Energiateollisuus; STUL 2007). Kuvassa 4.3 on esitetty mittauseriaate 200 m:n virta-apuelektrodilla.



Kuva 4.3 Käännepistemethodän mittausperiaate (Energieateollisuus)

Maadoituksen ja virta-apuelektrodin ympärille muodostuu vastakkaismerkkisiä potentiaalintasausrenkaita. Teorian mukaan potentiaalın käännepiste sijaitsee 62 %:n etäisyydellä mitattavasta elektrodista, eli kuvan tapauksessa noin 120 m:n kohdalla. Käytännössä on kuitenkin hyvin vaikea tietää tarkasti missä elektrodu sijaitsee maaperässä ja neutraalimaa voikin sijaita teorian mukaisen pisteen molemmın puolin elektrodin sijainnista riippuen. Tästä syystä mittaaminen vain tältä etäisyydeltä riittää ainoastaan kuntotarkastuksissa ja silloinkin vain, kun tiedetään mittauspisteen sijaitsevan tarkasti samalla paikalla kuin edellisessä mittauksessa. (Energieateollisuus.)

Mitatuista arvoista tehdään kuvaajan 4.1 mukaisesti käyrä maadoitusresistanssista jänniteapuelektrodin etäisyyden funktiona, jossa pituuden arvot nolla ja 200 vastaavat maadoituksen keskiarvoista sijaintia sekä virtapiikin etäisyyttä.



Kuvaaja 4.1. Maadoituspotentiaali homogeenisessa maaperässä jänniteapu-elektrodin etäisyyden funktiona (Energiateollisuus)

Maadoitusresistanssin arvo luetaan käyrän vaakaosuudesta, käänne pisteestä tai 60 %:n etäisyydellä virta-apelektrodin johtimen pituudesta mitattavasta elektrodista päin katsottuna. Maaperän resistiivisyyden muutokset aiheuttavat usein käyrämuotoon poikkeamia, jolloin selvän vaakaosuuden tai käänne pisteen saaminen vaikeutuu. Tällöin käytetään 60 %:n sääntöä. (Energiateollisuus.)

Käänne pistemenetelmän 60 %:n -sääntö perustuu siihen, että mittaus suoritetaan maadoitusjärjestelmän sähköisestä keskipisteestä, joka sijaitsee usein muuntamalla. Tällöin saadaan maadoitusresistanssin pienin arvo eli sähköinen keskipiste on järjestelmän parhaiten maadoittava osa. Keskipisteen sijaintiin vaikuttavat elektrodin mitat ja erityisesti maaperän ominaisuudet. Kun mittaus tehdään keskipisteestä homogeenisessä maaperässä, saadaan käänne piste teorian mukaisesti 61,8 %:n etäisyydellä virta-apelektrodista mitattavasta maadoituksesta katsottuna. Muissa tapauksissa mahdollinen käänne piste esiintyy käyrän muussa osassa, mikä täytyy huomioida maadoitusresistanssin arvoa luettaessa. (Neuvonen 1979; Suuronen 2006.)

Jännite- ja virta-apuelektrodien johtimet ovat usein vierekkäisillä keloilla, ja johtimissa on merkit mittauksen helpottamiseksi ja mittaustarkkuuden parantamiseksi. Johtimet eivät saa olla rinnakkain lähellä toisiaan tai samassa asennossa toisiinsa nähden koko pituudeltaan. Jos käytetään pitkää yhdysjohdinta neutraalimaan löytämisen helpottamiseksi, pitää sen resistanssi vähentää mitatuista tuloksista. Huonosti johtavalla maalla voidaan käyttää rinnakkaispiikkejä, joilla parannetaan mittarin erottelukykyä. Pitkillä virta-apuelektrodin pituuksilla mittaus tehdään kahden henkilön työryhmällä. Toinen vetää elektrodit ja johtimet maastoon toisen suorittaessa mittauksen ja kelaamisen. Viestinnän helpottamiseksi suositellaan radiopuhelimien käyttöä. Mittauspöytäkirjaan merkitään mitaajien nimet, mittausajankohta ja -tulos, mitattavan kohteen tiedot, resistanssi-kuvaaja ja mittaussuunta. (Energiateollisuus.)

4.2.2 Virhetekijät

Mitattuihin tuloksiin voivat vaikuttaa kaksikerrosmaa, häiriöjännitteet ja johtavat yhteydet maassa. Nämä aiheuttavat tuloksiin ja käyriin poikkeamia, jolloin maadoitusresistanssille ei välttämättä saada oikeaa tulosta. Mittaussuunnan valinta ei yleensä vaikuta mittaustuloksiin. (Energiateollisuus.)

Kaksikerrosmaalla tarkoitetaan maan eri kerrosten sähkönjohtavuuden vaihtelua. Kaksikerrosmaan teoreettista vaikutusta maadoitusresistanssiin voidaan laskea erilaisten menetelmien avulla. Taittumiskerroin K kuvaa maakerrosten resistiivisyyksien erotusten ja summien suhdetta. Käytännössä $-0,7 \leq K \leq 0,7$. Kertoimen eri arvoilla resistanssikäyrä saa homogeenisestä käyrästä poikkeavia muotoja. Kertoimien itseisarvojen ollessa $0,7$ käyrä poikkeaa homogeenisestä käyrästä enemmän, kun alempi kerros on huonommin johtavaa. Maaperän ominaisuudet voivat vaihdella myös sivusuunnassa tarkkarajaisina tai asteittaisina muutoksina. Suomessa alemman kerroksen ajatellaan kuitenkin olevan peruskalliota, minkä vuoksi kaksikerrosmaatapaus kuvaa parhaiten täällä vallitsevia olosuhteita. (Neuvonen 1979; Nieminen 1979; Ramdan ym. 2009.)

Johtavat yhteydet, kuten putkistot, vaikuttavat mittaustarkkuuteen antamalla liian pieniä arvoja. Erityisesti elektrodin päältä mittaaminen näkyy käyrässä ole-

vana kuoppa. Myös mittausjohtimiin indusoituvat häiriöjännitteet voivat vaikeuttaa tulosten saamista, jos mittaus tehdään esimerkiksi suurivirtaisten maakaapeleiden läheisyydessä. (Energiateollisuus.)

5 ISSOY:N JAKELUVERKKO

Imatran Seudun Sähkö Oy:n jakeluverkko kattaa Imatran sekä osin Ruokolahden, Rautjärven ja Taipalsaaren kuntien alueet. Myös Puumalassa ja Lappeenrannassa on muutamia liittymiä. Jakeluverkko on kasvanut yritysostojen ja fuusioitumisten seurauksena nykyiseen kokoonsa. Liitteessä 3 on esitetty keskijänniteverkon rakenne, jossa mustat viivat ovat ilmajohtoja ja vihreät sekä siniset maakaapeleita. Karttaliitteessä on myös verkkoa syöttävät sähköasemat.

5.1 Jakeluverkon rakenne

Sähkön siirto on toteutettu 20 ja 0,4 kV:n jänniteportailta. Sähkön siirron ja käytövarmuuden kannalta tärkeän kj-verkon pituus on noin 880 km, josta avojohto kattaa 63 %. Kj-verkosta suuri osa sijaitsee haja-asutusalueilla, joilla etäisyydet ovat pitkiä ja siirretyt tehot pieniä. Maakaapelia on noin 120 km erityisesti taajama-alueilla, joissa kulutus on suurempaa ja johtokatuongelmat sekä ympäristökijät vaikuttavat ilmajohtojen käyttöön. PAS-johdolla on lähinnä saneerattu vanhoja linjoja teiden varsiin koko jakelualueella jälleenkytkentöjen vähentämiseksi. Sähkön pienkuluttajille siirto tapahtuu noin 1875 km pitkää pj-verkkoa pitkin. Kj-asiakkaita verkossa on seitsemän kappaletta.

Sähköasemia on kaikkiaan seitsemän, joista yksi saa syöttönsä Fortum Oyj:n omistamasta vesivoimalaitoksesta ja kuusi liittyy Fingrid Oyj:n kantaverkkoon 110 / 20 kV:n kytkinaseman kautta. Imatran Energian omistama kaasuturbiinivoimalaitos tuottaa kaukolämpöä ja sähköenergiaa, joka syötetään jakeluverkkoon. Yhteensä johtolähtöjen kautta syötettäviä muuntamoita on noin 760 kappaletta. Sähköasemien tiedot on esitetty taulukossa 5.1, jossa johtolähdöt ja

muuntopiirit eivät sisällä asemien omakäyttömuuntajia tai -lähtöjä eivätkä varayhteyksiä eli asemien keskinäisiä johtolähtöjä.

Taulukko 5.1.Sähköasemien tiedot

Sähköasema		Jännitetaso	Päämuuntajan teho	Johtolähdöt	Avojohto	PAS	Maakaapeli	Muuntopiirit
		(kV)	(MVA)	(kpl)	(km)	(km)	(km)	(kpl)
MA1	Mansikkala	110 / 20	25	12	18,5	2,3	37,1	93
MA2	Immala	110 / 20	25	7	19,4	7,5	27,4	71
MA4	Vennonmäki	110 / 20	10	6	123,1	47,7	4,8	133
MA5	Fortum	10 / 20	16	5	18,4	5,8	15,8	52
MA6	Rajapatsas	110 / 20	25	9	53,5	28,7	19,7	95
MA7	Syyspohja	110 / 20	10	5	166,9	61,6	2,7	143
MA9	Saarlampi	110 / 20	16	9	149,9	50,6	10,2	167
MA10	Kaasuturbiinivoimalaitos	6,3 / 20	2 x 5,5	1				
Yhteensä				54	549,7	204,2	117,7	754

Kaasuturbiinivoimalaitokselta sähkö ohjataan normaalitilassa verkkoon yhden johtolähdön kautta. Imatran alueella verkkoa syöttävät pääosin Mansikkalan, Immalan, Fortumin ja Rajapatsaan asemat, mikä näkyy muun muassa ilmajohtojen ja maakaapelin pituuksien suhteesta. Haja-asutusalueille siirto tapahtuu suurimmaksi osaksi Saarlammen, Vennonmäen ja vuonna 2010 rakennetun Syyspohjan kevyen sähköaseman kautta, joilla myös verkon pisimmät johtolähdöt sijaitsevat. Vennonmäen ja Saarlammen maakaapelin osuutta selittävät muun muassa pienet taajama-alueet.

Sähköasemien keskinäisillä ja naapurisähköyhtiöiden välisillä yhteyksillä parannetaan käyttövarmuutta turvaamalla sähköjakelu vika- ja häiriötilanteissa. Ilmajohtoverkkoa käytetään normaalisti säteittäisesti, mutta vikatilanteissa syöttö voidaan ohjata joillakin johtolähdöillä rengasmaisesti kauko-ohjattujen erotinasemien avulla toista reittiä pitkin, joita jakeluverkossa on 27 kappaletta. Eri-tyisesti Ruokolahden alueella vuosien 2008 ja 2010 aikana valmistuneet yhdysjohtot ja erotinasemat lisäävät syöttömahdollisuuksia vikatilanteissa. Myös Rautjärvellä erotinaseman yhteyteen asennetulla maastokatkaisijalla Niskapietیلän lähtö voidaan jakaa kauko-ohjatusti kahteen osaan. Maakaapelialueilla käytetään silmukoitua verkkoa, jossa muuntopiirit muodostavat rengasyhteyksien lisäksi myös renkaan välisiä yhteyksiä, mikä lisää varasyöttömahdollisuuksien määrää. Tällä estetään vian korjauksessa kaapeliverkoille ominaiset pitkät kes-

keytykset ja parannetaan sen myötä käyttövarmuutta. Maakaapeliverkkoa käytetään normaalisti säteittäisesti ilmajohtoverkon tavoin.

Saarlammen, Vennonmäen ja Syyspohjan asemat syöttävät yli puolia jakeluverkon muuntopiireistä joskin siirretyt tehot ovat melko pieniä. Haja-asutusalueiden ilmajohtoverkossa käytetään pylväsmuuntamoita, joita on noin 75 % kaikista muuntamoista ja maakaapelialueilla puisto- sekä kiinteistömuuntamoita.

ISSOY:llä käytetään Teklan Xpower verkkotietojärjestelmää, jonka tietokantaan on tallennettu koko jakeluverkko komponentteineen. Ohjelmalla tehdään muun muassa verkon sähköistä mitoitusta ja laskentaa sekä hallitaan kunnossapitoa. Verkkotietojärjestelmää on laajennettu vuonna 2009 käyttöönotetulla käytöntuki-järjestelmällä, jolla voidaan parantaa monin tavoin verkon hallintaa erityisesti vikatilanteisiin liittyen. Sitä voidaan käyttää kytkentöjen suunnittelun ja vikatilanteiden hallinnan apuna sekä vikaraportoinnissa, jolloin saadaan tarkempaa tietoa keskeytyksistä ja vapaudutaan taulukkopohjaisten tilastojen tekemisestä.

5.1.1 Jakeluverkon maadoitukset

Maadoitusten suunnitteluperusteena on käytetty SFS 6000 pienjännite- ja SFS 6001 suurjännitesähköasennukset -standardien vaatimuksia. Koska jakeluverkon muuntopiireissä käytetään yhdistettyä maadoitusta, määrittelee standardi SFS 6001 tarkemmin sen käyttöön ja maadoituksen rakenteeseen liittyviä ehtoja. Maaperämittauksia ei ole käytetty maadoitusten suunnittelun apuna vaan muuntopiireihin on lisätty tapauskohtaisesti maadoituselektrodeja rakennusvaiheessa tai jälkikäteen esimerkiksi maadoitusverkon suppeuden tai huonon maaperän takia.

Maadoituselektrodit ovat olleet jo muutaman vuosikymmenen ajan lähinnä kuparisia 20 – 30 m pitkiä 25 ja 16 mm²:n poikkipintaisia vaakaelektrodeja. Myös pysty maadoituksia on käytetty, mutta kivikkoisesta maaperästä johtuva vaikea asentaminen on rajoittanut niiden käyttöä.

Maakaapeleiden rinnalle on asennettu aina 25 mm²:n maadoituskupari myös kaapeleilla, joissa on itsessään maadoitusköysi. Samoin on menetelty pjrunkokaapeleiden osalta jakokaappien väleille asennetuilla maadoituskupareilla. Edellä mainitut seikat ovat myötävaikuttaneet laajan maadoitusverkon kokoon, johon kuuluu vajaa 20 % jakeluverkon muuntopiireistä. Imatran kaupunkialueen lisäksi laaja maadoitusverkko muodostuu Ruokolahden Rasilan alueella. Ilmajohtoverkoissa huonosti johtavilla alueilla muuntopiirejä on yhdistetty toisiinsa muuntopiirien välisillä kj-johdoilla usein PAS-johtojen yhteydessä tai viety muuntamon maadoituksia muutaman pylväsvälin päähän paremmin johtavalle alueelle. Vuoden 2003 jälkeen käyttöönotetuille pylväsmuuntamoille on rakennettu potentiaalinhjaus, joka on muun muassa ehtona maadoitusjännitteen $U_E \leq 4U_{TP}$ käytölle.

Sähköasemien maadoitusresistanssit mitataan 12 vuoden välein VA-menetelmällä. Kaikki jakeluverkon sähköasemat täyttävät niille asetetut maadoitusvaatimukset, joskin Syyspohjan sähköasemalla huono maaperä aiheutti ongelmia käyttöönottomittausten yhteydessä ja vaaditun arvon saavuttamiseksi jouduttiin käyttämään erikoismenettelyjä.

5.1.2 Keskijänniteverkon maadoitustapa

Keskijänniteverkko on täysin maasta erotettu. Päämuuntajien kytkentäryhmä on YNd11. Toision kolmiokytkennästä johtuen kompensointia varten tarvittava nol-lapiste pitäisi tehdä erillisellä ZN-kytkentäisellä maadoitusmuuntajalla, joka muodostaa osan piirin reaktanssista (Mörsky 1992, 321 - 322).

5.1.3 Maasulkusuojaus

Jakeluverkossa käytetään suunnattua laukaisevaa maasulkusuojausta jokaisella sähköasemalla. Releet ovat vaihekulmasuuntareleitä eli niiden toiminta perustuu nolajännitteen ja -virran sekä näiden välisen kulman mittaukseen.

Jälleenkytkentöjä käytetään ilma- ja sekajohtolähdöissä, joissa pikajälleenkytkennän (pjk) jännitteetön aika on 0,5 s ja aikajälleenkytkennän (ajk) 120 s. Jäl-

leenkytkentöjen yhteydessä käytettävillä hidastus- eli polttoajoilla poltetaan vian aiheuttaja pois vikapaikasta ja jännitteettömillä ajoilla sammutetaan valokaari. Hidastusaikoja pyritään pitämään mahdollisimman pitkinä, jotta poltolla on mahdollisimman suuret edellytykset onnistua. Näin vähennetään turhien katkaisijatoimintojen ja lyhyehköjen keskeytysten määrää. Aikoja rajoittavat kuitenkin suurimmat sallitut kosketusjännitteet sekä oikosulkujen aikaiset johdinlämpenemät. Aikalaukaisun hidastusajat ISSOY:n sähköasemilla ennen pjk:ta, jälkeen ajk:n ja näiden välissä ovat johtolähdöstä riippuen 0,15 – 0,4 s.

Mikäli jollekin sähköasemalle investoitaisiin maasulkuvirran keskitetty kompensointilaitteisto, ei se välttämättä aiheuttaisi maasulkureleiden uusimista, sillä myös nykyisillä releillä voidaan käyttää eri asetteluja, kun verkkoa käytetään maasta erotettuna tai sammutettuna.

5.2 Keskeytykset

Taulukossa 5.2 on esitetty ISSOY:n ja Energiateollisuuden Suomen jakeluyhtiöiden tietojen perusteella tehtyjen keskeytystilastojen viiden vuoden energiapainotetut keskiarvot eri keskeytystyypeittäin. Luvuissa huomioidaan siis keskeytyksen alueella olevien muuntopiirien ja verkon vuotuisten energioiden suhde.

Taulukko 5.2 Energiapainotetut keskeytystunnusluvut

Keskeytystyyppi	ISSOY	Energiateollisuuden tilastot
Odottamaton pitkä (h/a)	0,91	1,11
Odottamaton pitkä (kpl/a)	1,06	1,77
Suunniteltu (h/a)	0,32	0,40
Suunniteltu (kpl/a)	0,23	0,25
AJK (kpl/a)	0,82	0,78
PJK (kpl/a)	4,30	2,14

Odottamattomia pitkiä keskeytyksiä ISSOY:n jakeluverkossa on vähemmän ja niiden keskimääräinen kesto on lyhyempi kuin valtakunnallisella tasolla, kun

taas pjk:jen määrä on kaksinkertainen. Odottamattomista keskeytyksistä siis suuri osa on ohimeneviä vikoja, jotka poistuvat pikajälleenkytkentöjen avulla.

Jakeluverkkoon on tehty muutaman viime vuoden aikana monia luvussa 5.1 lueteltuja käyttövarmuutta parantavia investointeja, joilla pyritään vähentämään keskeytysten määrää ja lyhentämään niiden kestoa sähkön laadun parantamiseksi ja kustannusten pienentämiseksi sekä asiakkaan että verkkoyhtiön kannalta.

Vuosien 2007 ja 2010 välisenä aikana keskimääräisesti eniten onnistuneita jälleenkytkentöjä on ollut tietyillä Vennonmäen ja Saarlammen asemien pitkillä johtolähdöillä, joissa avojohto kulkee metsiköissä ja muissa käyttövarmuuden kannalta epäedullisissa paikoissa. Tämä selittää suurelta osin pikajälleenkytkentöjen määrän. Jälleenkytkentähuiput osuvat myrskyistä johtuen kesäkuukausille, mutta myös runsaslumiset ja myrskyisät talvet näkyvät tilastoissa jälleenkytkentöjen kasvuna, vaikka esimerkiksi lumikuorman takia johtoon nojaava puu aiheuttaa usein pidemmän keskeytyksen. Loppuvuodesta 2010 käyttöön otettu Syyspohjan sähköasema on vaikuttanut verkon keskeytyksiin, kun Vennonmäen vikaherkät johtolähdöt on jaettu näiden asemien kesken. Syyspohjan asema on otettu tilastointiin vuoden 2011 alusta, joten varmaa tilastotietoa muutoksesta saadaan vasta vuoden lopulla.

Vikaherkimmät johtolähdöt myös kasvattavat keskeytyskustannusten määrää suhteellisesti eniten, jolloin jälleenkytkentöjen ja erityisesti pjk:jen määrää vähentävän kompensoinnin merkitystä ei pidä tarkastella vain maadoitusjännitteitä pienentävänä tekijänä.

5.3 Verkon kunto ja investoinnit

Energiamarkkinavirasto ohjaa ja valvoo sähköverkkoliiketoimintaa nelivuotisilla valvontajaksoilla, joiden tarkoitus on tehostaa jakeluverkkoyhtiöiden toimintaa, kannustaa verkon ylläpitoon sekä poistaa monopoliaseman väärinkäyttö. Valvontamallin syy-seuraus suhteiden tarkastelu on melko työlästä muun muassa mallin eri tekijöiden määrästä ja rakenteesta johtuen, mutta yksinkertaistettuna

valvontamallissa verkkoyhtiöille määritetään vuosittain sallitun tuoton taso, jonka mahdolliset poikkeamat korjataan vuosittain tai valvontajakson aikana. Kaikki verkkoon tehtävät investoinnit kasvattavat sen jälleenhankinta- (JHA) tai nykykäyttöarvoa (NKA) ja sitä kautta joko suoraan tai välillisesti myös kohtuullisen pääoman tuoton määrää. Malli kannustaa siis verkon investointeihin. Jälleenhankinta-arvo lasketaan verkon komponenttien lukumäärien ja EMV:n yksikköhintojen perusteella ja nykykäyttöarvo edellisen vuoden NKA:n, tasapoistojen ja investointien perusteella. Tietylle vuodelle laskettu NKA korjataan vielä rakennuskustannusindeksin muutoksella vastaamaan senhetkistä kustannustasoa. (Honkapuro ym. 2010.)

ISSOY:n jakeluverkon vuoden 2010 NKA% oli 62,0, eli verkko on hyvässä kunnossa ja se on tarkoitus pitää tulevaisuudessa vähintään samassa tilassa. Verkon suunnittelun ja investointien kohdentamisen lähtökohtana on minimoida kustannukset ja häviöt sekä tarjota asiakkaille hyvälaatuista sähköä kohtuulliseen hintaan lakien ja määräysten vaatimukset huomioiden.

Vuoden 2020 jälkeen on odotettavissa lisääntyvät verkon saneeraukset, joita aiheuttavat muun muassa vanhat kj- ja pj-pylväät. Erityisesti Imatran kaupunkialueella on vanhaa ja huonokuntoista pj-ilmajohtoverkkoa. Myös iso osa jakelumuntajista on pitoaikojensa lopussa. Suurimmat saneerausinvestoinnit on määriteltävä viiden vuoden välein, jotta ne eivät kasaannu tulevaisuudessa liian lyhyelle aikavälille. Tällaisia ovat muun muassa Mansikkalan ja Immalan sähköasemat, jotka ovat hyvin lähellä 45 a pitoajan loppua. Myös ensimmäiset rakennetut erotinasemat alkavat olla saneeraustarpeessa.

Käyttövarmuus on yksi vahvasti investointeja ohjaava tekijä erityisesti johdinlajien valinnassa. Kasvavat vaatimukset sähkön toimitusvarmuuden suhteen voivat muuttaa nykyisiä johdinvalinnan perusteita lyhyellä aikavälillä. ISSOY:llä maakaapeloinnin rakentamiseen kesän 2010 Asta-myrsky ei kuitenkaan vaikuttanut. Vanhoja kj-linjoja saneerataan pääasiassa teiden varsiin PAS-johdolla, maakaapelia käytetään kaupunki- sekä taajama-alueilla ja avojohtoa, kun edellä mainittujen johdinlajien käytölle ei ole perusteita. Pj-johtoina käytetään maaka-

pelialueita ja ilmajohtoa, joista ensisijaisesti rakennetaan maakaapelia paremman käyttövarmuuden takia.

Vuonna 2010 rakennettu Syyspohjan kevyt sähköasema vaikuttaa verkon käyttövarmuuteen Vennonmäen osalta, jonka pitkät vikaherkät johtolähdöt on jaettu pienempiin suojausalueisiin uuden aseman myötä. Aseman vaikutuksista keskeytyksiin ja sähkön laatuun saadaan muutaman vuoden kuluttua tilastotietoa, jota voidaan edelleen käyttää apuna jakeluverkkoon tehtävien investointien kohdentamisessa. Myös Niskapietilän maastokatkaisija on puhtaasti käyttövarmuuden parantamiseen ja sähkön laatuun tähtäävä investointi.

5.4 Maasulkulaskelmat

Maasulkuvirtojen laskenta tehtiin Xpowerilla, joka käyttää tietokantaan tallennettujen komponenttien arvoja, kuten johdinten maakapasitansseja ja pituuksia. Siinä on myös maasulkureleiden koestettujen toiminta-ajat, joiden perusteella sallittujen maadoitusresistanssien arvot osittain määräytyvät. Xpowerissa on mahdollista tulostaa laskentatulokset tiedostoon jatkokäsittelyä varten. Tuloksista kerättiin kaikki työn kannalta tarpeellinen tieto, joista tehtiin Excel-taulukot.

Ensin laskettiin asemakohtaiset maasulkuvirrat, ja sen jälkeen varasyöttötilanteita vastaavat arvot erilaisissa vikatilanteissa. Suurimpina maasulkuvirtoina päätettiin käyttää arvoja, joissa sähköasema syöttää myös toisen aseman johtolähtöjä. Korvaavuudella varmistetaan, että kun yksi asema ei osallistu verkon syöttämiseen, voidaan sen johtolähtöjen sähkönjakelu kuitenkin toteuttaa turvallisuusvaatimukset täyttäen. Virtoja korjattiin vielä ylöspäin verkon laajentumisen ja oletettavan kaapelointiasteen kasvamisen takia.

Tämän jälkeen laskettiin sallitut maadoitusresistanssien arvot johtolähdöittäin. Xpower ilmoittaa arvot sekä vanhojen turvallisuusmääräysten asennusryhmien että nykyisen standardin kosketusjännitteiden mukaisesti. Tarkasteluissa käytettiin voimassa olevan SFS 6001 -standardin ehtoja $U_E \leq 2U_{TP}$ ja $U_E \leq 4U_{TP}$.

6 MAADOITUSMITTAUKSET

Muuntopiirien maadoitusmittaukset tehtiin pääosin vuonna 2010 touko- ja elokuun välisenä aikana. Mittauksiin tuli reilun kahden viikon tauko, kun Astamyrsky iski 30. heinäkuuta aiheuttaen tuhoja viiden maakunnan alueella, sillä kaikki saatavilla olevat resurssit kohdennettiin myrskytuhojen korjaamiseen.

Mittausmenetelmänä käytettiin ISSOY:n kunnossapitosuunnitelman mukaisesti käännepistemenetelmää, joka on vakiintunut yleisestikin muuntopiiritasolla tehtävien mittausten osalta. Vaikka sen hyviin puoliin lukeutuvat mittaamisen helpous ja mittauksen aikainen häiriötön sähkönjakelu, on se kompromissi mittaus-tarkkuuden suhteen. Käännepistemenetelmän hyvä puoli on myös, että mittajien ei tarvitse välttämättä olla sähkölaitosasentajia vaan mittauksia voivat tehdä myös perehdytetyt henkilöt, kuten tässä tapauksessa.

Virta-apuelektrodin etäisyytenä käytettiin Energiateollisuuden suositusten mukaisesti 200:aa metriä. Mikäli maasto tai muuntopiirin rakenne rajoitti mittaus-suuntia, käytettiin joskus myös puolta lyhyempää etäisyyttä.

Mittaukset tehtiin pääosin kolmen hengen työryhmällä, mikä helpotti erityisesti mittauslaitteiston kantamista maaston ollessa vaikeakulkuista. Itse mittauksessa yksi veti vuorotellen mittausjohtimet ja siirsi elektrodeja mittauksen ajan, toinen suoritti mittauksen ja johtimien kelauksen ja kolmas kirjasi tulokset liitteen 4 mukaiseen mittauspöytäkirjaan. Mittaussuunnista tehtiin karttaliitteet, jotka liitettiin yhteen pöytäkirjojen kanssa.

Mittausten piiriin kuuluivat kaikki paitsi laajaan maadoitusverkkoon kuuluvat sekä vuoden 2006 jälkeen mitatut muuntopiirit. Myös ulkopuolisten tahojen omistuksessa olevat muuntajat ja luonnollisesti myös sähköasemien omakäyttömuuntajat jätettiin pois. Kokonaisuudessaan mitattavia muuntopiirejä oli touko-kuussa 544 kappaletta. Jakeluverkon muuntopiirit on jaettu maantieteellisesti eri kunnossapitoalueisiin, joiden perusteella myös mittaukset pääosin tehtiin. Ensi-

sijaisina kohteina olivat haja-asutusalueiden muuntopiirit, joista oli tarkoitus edetä Imatralle aikataulun niin salliessa.

6.1 Mittauslaitteisto

Maadoitusmittarina käytettiin Chauvin Arnoux C.A 6460:aa, jolla on mahdollista mitata myös maaperän resistiivisyys Wenner-menetelmällä. Laitteessa on suuri valaistu näyttö, joka ilmoittaa mitatun resistanssin arvon kahden desimaalin tarkkuudella, kun $R \leq 19,99 \Omega$. Mittausvirta vaihtelee 10,0, 1,0 ja 0,1 mA:n välein riippuen maadoitusresistanssin arvosta taajuuden ollessa 128 Hz. Mittarissa on Fault, High resistance ja High noise -vikavalot, jotka ilmoittavat, mikäli virtapiiri on poikki, mitattavan elektrodin ja jänniteapuelektrodin välillä on liian suuri resistanssi tai mittauspiirissä on häiriöjännitteitä. Laite on kaksoiseristetty ja sen kotelointiluokka on IP53, minkä ansiosta sen käyttöolosuhteet ovat melko laajat. (Chauvin Arnoux 2001a.)

Mittaajien ja elektrodeja siirtävän henkilön välillä kommunikointiin käytettiin radiopuhelimia välimatkan ja vaihtelevan maaston takia. Käytetty maadoitusmittari ja radiopuhelin on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1 Maadoitusmittari Chauvin Arnoux A.C 6460 ja VIRVE-radiopuhelin

Mittausjohtimet olivat kahdella vierekkäisellä kelalla. Johtimiin oli merkitty mitattavat välimatkat mittauksen helpottamiseksi ja tarkkuuden parantamiseksi. Johtimet yhdistettiin apuelektrodien päässä banaani liittimillä T-mallisiin, noin 40 cm pitkiin mittauselektrodeihin eli -piikkeihin ja mittariin hauenleuoilla sekä banaani liittimillä. Yhdysjohtona käytettiin noin 15-metristä kuparijohdinta, joka liitettiin maadoitusjohtimen routalenkkiin hauenleualla. Johtimen DC-vastus $0,2 \Omega$ vähennettiin mittaustuloksista.

6.2 Mittaaminen

Mittaukset oli määrä tehdä muuntamoilta aina, kun siihen oli mahdollisuus ja resistanssikuvaajasta voitiin lukea maadoitusresistanssin arvo. Mittauksissa oletettiin sähköisen keskipisteen sijaitsevan muuntamolla, jolloin sieltä saataisiin myös pienin maadoitusresistanssin arvo. Tällöin täytyi huomioida, ettei 60 %:n - sääntö välttämättä päde kuvaajaa luettaessa.

ISSOY:n jakeluverkko sijaitsee Imatraa ja muutamia taajamia lukuun ottamatta haja-asutusalueilla, joissa muuntopiirit eivät välttämättä ole hyvin tiheään rakennettuja, mikä helpotti muuntamolta mittaamista sähköisessä mielessä. Taajama-alueilla mittaaminen oli hankalampaa tiheän verkon takia.

Maasto ja ympäristö vaikeuttivat mittaussuuntien ja -paikkojen valintaa huomattavasti. Tiheiden risukoiden ja vaikeakulkuisen maaston takia mittausjohtimien vetäminen oli paikoitellen erittäin hidasta ja vaikeaa. Myös rakennukset, aidat, tiet ja muut rakennelmat rajoittivat mittauksia huomattavasti. Erityisesti teiden ja liikenteen läheisyydessä oli huomioitava vaaratekijät, joita muun muassa pitkät mittajohtimet voivat aiheuttaa.

Maaperän vaikutus huomioitiin pyrkimällä valitsemaan mittaussuunta hyvin johdettavassa maaperässä. Muuntamon sijaitessa pellon vieressä mittaus tehtiin mahdollisuuksien mukaan pellon suuntaan. Kivikoita, kallioita ja muita huonosti johtavia alueita vältettiin, vaikka tietyissä paikoissa se oli käytännössä mahdollista. Mikäli mittausjohtimet vedettiin tien suuntaisesti, vietiin apuelektrodit paikasta riippuen muutama metri tien sivuun. Tällä pyrittiin minimoimaan tien ra-

kenteesta johtuvan pintamaan suuremman resistiivisyyden vaikutus mittaustulokseen. Mittaus uusittiin toiseen suuntaan tai eri paikasta, mikäli käyrää ei saatu muodostumaan.

Mittaussuuntien ja -paikkojen valintaa helpotti yhdysjohto, jonka avulla mittaus voitiin aloittaa kauempana muuntamosta. Mittaamisen luotettavuuden ja mahdollisimman suotuisien mittaolosuhteiden vaatimukset ovat kuitenkin toisensa poissulkevia tai vähintäänkin ristiriitaisia, minkä takia mittaussuuntien suhteen jouduttiin tekemään kompromisseja. Peltojen ja tiheän kasvillisuuden läheisyydessä sijaitsevien muuntamoiden mittaaminen saattaisi olla helpointa keväisin ja syksyisin, kun pelloilla pääsisi kulkemaan vapaammin, eivätkä heinikot ja risukot vaikeuttaisi kulkemista.

Mittauspiikit pyrittiin upottamaan maahan koko pituudeltaan hyvän yhteyden saavuttamiseksi, mikä tuotti vaikeuksia kivikkoisessa tai erittäin tiiviissä maaperässä. Mittari ilmoitti melko usein liian suuresta resistanssista mitattavan elektrodin ja jänniteapuelektrodin välillä. Tämä selvisi usein jänniteapuelektrodin paikkaa muuttamalla, ja mittaus saatiin vietyä loppuun. Huonosti johtavilla alueille käytettiin rinnakkaispiikkejä, mikä helpotti mittauksen edistymistä. Maadoitusresistanssin arvoon sillä ei ollut käytännön merkitystä.

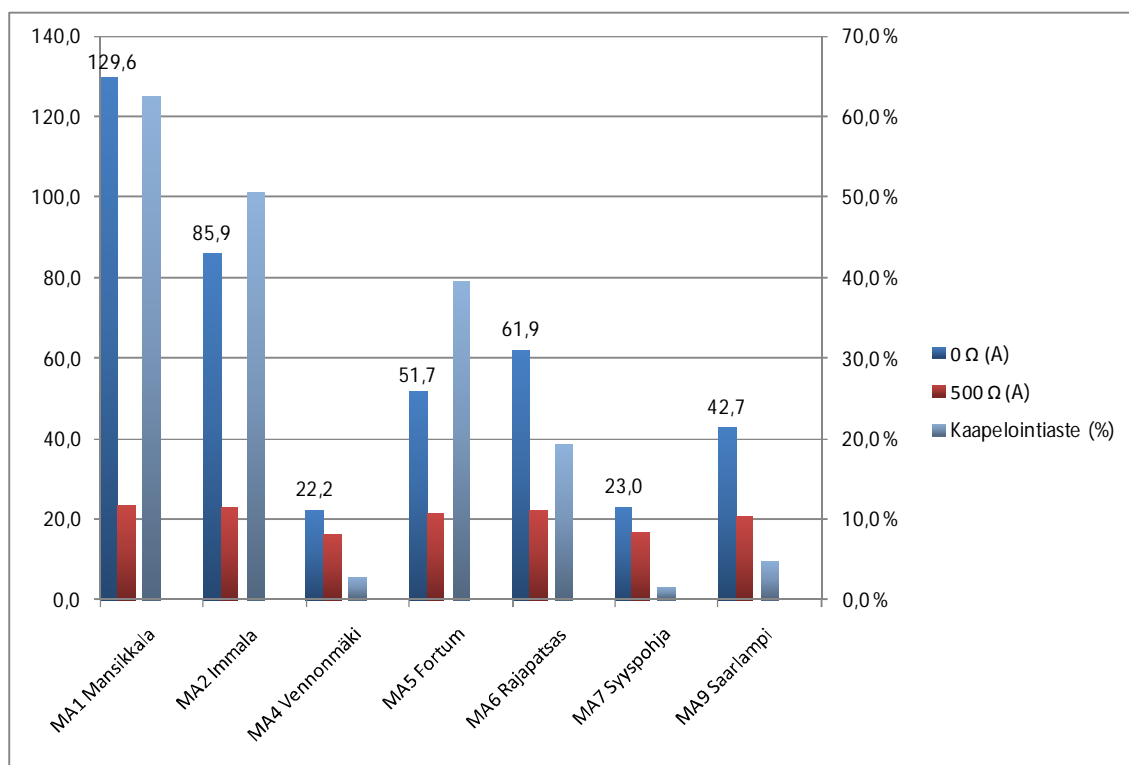
Mittauksessa apuelektrodien johtimet liitettiin mittariin ja mittausspiikkeihin banaaniliittimillä, joita jouduttiin vaihtamaan useasti niiden heikon rakenteen takia. Kolvaukset heikentyivät ja liittimien kontaktipinnat kuluivat ja löystyivät mittaolosuhteista johtuen. Myös yhdysjohtimen ja maadoitusjohtimen liitokseen piti kiinnittää huomiota, sillä maadoitusjohtimet olivat usein hapettunutta kuparia. Tämä hoidettiin hankaamalla johtimeen näkyviin kirkas kuparipinta.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Maasulkulaskennan ja maadoitusmittausten tulosten tarkastelun apuna käytettiin taulukkolaskentaa, johon mittaus- ja laskentatulokset sekä verkkotietojärjestelmästä haetut tiedot koostettiin.

7.1 Maasulkulaskenta

Ensin laskettiin sähköasemakohtaiset maasulkuvirrat normaalissa käyttötilanteessa. Laskennassa pääjännitteenä käytettiin 20,5 kV. Saaduissa tuloksissa on laskettu aseman jokaisen johtolähdön tuottaman sekä muiden johtolähtöjen sille tuottaman maasulkuvirran arvo. Kuvaajaan 7.1 on kuitenkin kerätty vain sähköasemien resuloivat maasulkuvirrat, sillä maadoitusresistanssien mitoitusvirrat määräytyvät niiden perusteella.

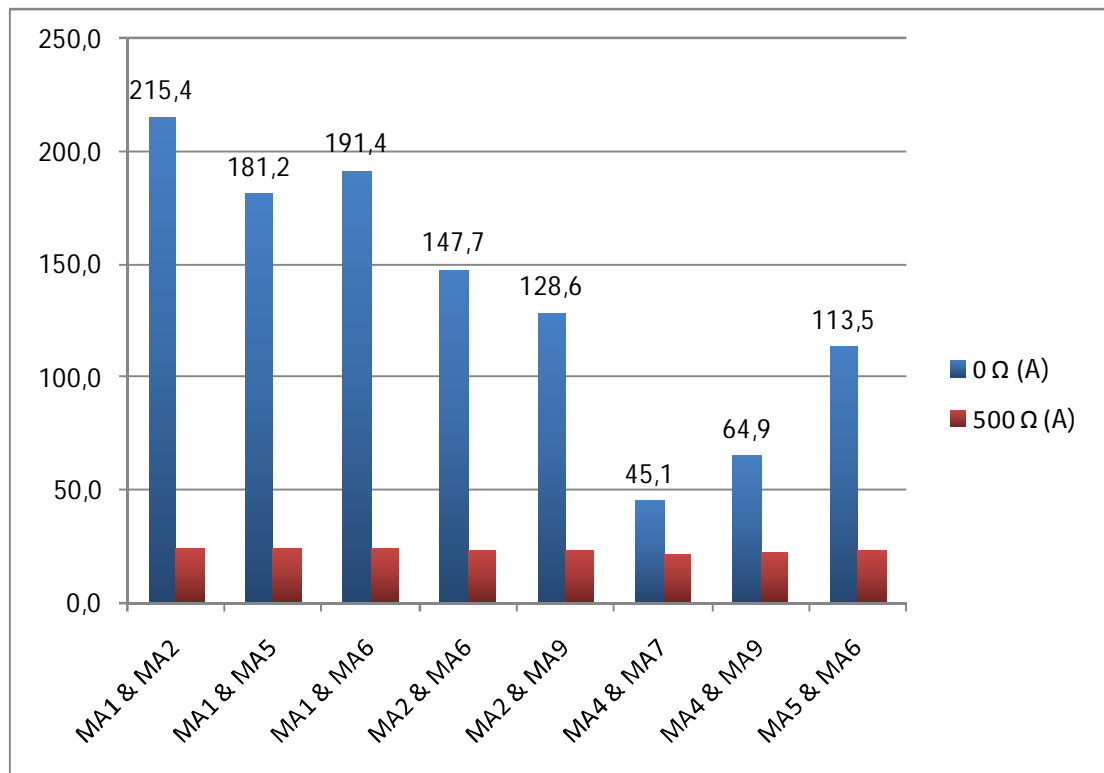


Kuvaaja 7.1 Sähköasemien maasulkuvirrat ja kaapelointiasteet

Vasemmanpuoleiset pylväät kuvaavat vikaresistanssittoman ja keskimmäiset 500 Ω vikaresistanssin kautta tapahtuvien maasulkuvirtojen arvoja. Nähdään,

että suurimmat maasulkuvirrat ovat Imatran alueen sähköasemilla Mansikkalassa, Immalassa, Fortumilla sekä Rajapatsaalla, joissa myös maakaapelointias- teet ovat muita asemia korkeammat. Muilla asemilla vähäinen maakaapelin osuus näkyy pienempinä virtoina, vaikka johtopituudet ovat huomattavasti suu- remmat. Vuonna 2010 rakennettu Syyspohjan sähköasema on laskenut Ven- nonmäen maasulkuvirran arvon alle puoleen vuoden 2008 maasulkulaskennan tulokseen verrattuna, kun johtopituudet on voitu jakaa asemien päämuuntajien kesken, joskin luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia muun muassa tällä aikavä- lillä kasvaneiden johdinpituuksien takia.

Seuraavaksi laskettiin suurimmat virrat varasyöttötilanteissa, joiden perusteella valittiin maadoitusresistanssien laskentaan käytettävät maasulkuvirrat. Sähkö- asemilla, joilla on yhteisiä jakorajoja eli joilla syöttö voidaan ottaa viereisen aseman syöttämältä johtolähdöltä, laskettiin maasulkuvirran suurin arvo. Tulok- set on esitetty kuvaajassa 7.2.



Kuvaaja 7.2. Sähköasemien maasulkuvirrat varasyöttötilanteissa

Kuvaajan arvot vastaavat siis tilannetta, jossa yhdellä sähköasemalla olisi syötettävänä molempien asemien yhteenlaskettu verkko. Se kumpi asema syöttää verkkoa ei ole käytännön merkitystä maasulkuvirtaan. Suurin virta on yhdistettäessä Mansikkalan ja Immalan johtolähdöt korkeasta maakaapelointiasteesta johtuen. Myös muilla Imatran alueen asemien yhdistelmillä maasulkuvirrat ovat yli 100 A. Vennonmäen ja Syyspohjan sekä Vennonmäen ja Saarlammen yhdistelmillä virrat jäävät huomattavasti pienemmiksi.

7.1.1 Maadoitusresistanssien mitoitusvirrat

Varasyöttölaskelmien pohjalta valittiin maadoitusresistanssien mitoitusvirroiksi taulukon 7.1 mukaiset arvot, joiden valinnassa huomioitiin verkon tulevaisuuden näkymät, kuten verkon laajentuminen ja maakaapelointiasteen kasvaminen.

Taulukko 7.1 Maadoitusresistanssien mitoitusvirrat

Sähköasemat	Mitoitusvirta (A)
MA1 Mansikkala MA2 Immala MA5 Fortum MA6 Rajapatsas	220
MA9 Saarlampi	150
MA4 Vennonmäki MA7 Syyspohja	80

Imatran alueen sähköasemien virran määräksi suurin maasulkuvirran arvo, joka syntyy yhdistettäessä Mansikkalan ja Immalan johtolähdöt. Samaa arvoa käytettiin siis Fortumin ja Rajapatsaan johtolähtöjen resistanssivaatimusten mitoitukseen.

Saarlammen asemaa voidaan syöttää sekä Immalan että Vennonmäen kautta. Immalan ja Saarlammen asemien yhteinen maasulkuvirta on hieman alle 130 A, joten mitoitusvirraksi valittiin 150 A, jolla resistanssivaatimukset pysyvät vielä kohtuullisissa rajoissa ja mitoitusvirta on kuitenkin yli kolminkertainen aseman omaan maasulkuvirtaan verrattuna.

Vennonmäen ja Syyspohjan mitoituksessa määräävä tekijä oli Vennonmäen ja Saarlammen 64,9 A:n maasulkuvirta. Verkon rakenteen muutokset huomioitiin 80 A:n mitoitusvirralla, joka oli hieman alle kaksinkertainen arvo asemien keskinäiseen maasulkuvirtaan verrattuna.

Valittujen mitoitusvirtojen avulla Xpowerilla laskettiin jokaisen sähköaseman johtolähdölle suurimmat sallitut maadoitusresistanssin arvot, joilla täytetään ehdot $U_E \leq 2U_{TP}$ ja $U_E \leq 4U_{TP}$.

7.2 Maadoitusmittaukset

Kesän 2010 mittaustuloksista tehtiin taulukko, joka helpotti saatujen tulosten tarkastelua. Taulukkoon lisättiin jokaista muuntopiiriä syöttävä sähköasema ja johtolähtö, maadoitusryhmä sekä lasketut maadoitusresistanssin suurimmat sallitut arvot. Xpowerista haettiin myös edellisten maadoitusmittausten tulokset joihin saatuja tuloksia verrattiin. Edelliset mittaukset oli tehty pääasiassa vuosien 2003 – 2006 välisenä aikana. Koska aivan kaikista, kuten vuonna 2009 rakennetuista muuntopiireistä, ei ollut vielä edellisiä mittaustuloksia, oli vanhojen mittaustulosten kokonaislukumäärä 487. Mikäli vanhat ja uudet tulokset olivat suuruusluokaltaan aivan erilaisia ja täyttivät eri maadoitusjännitteiden mukaiset ehdot, eikä tuloksia selittäneet esimerkiksi muuntopiirin rakenteen muutokset, päätettiin niitä vastaavat uudet mittaustulokset jättää huomiotta tarkastelussa. Näin tehtiin myös selvästi mittausrvirheestä johtuvien tulosten kanssa. Tällä tavoin suljettiin pois rajatapauksen mahdollinen vaikutus toimenpide-ehdotuksiin. Kyseiset muuntopiirit olisikin hyvä mitata uudestaan ennen toimenpiteisiin ryhtymistä, mikäli niiden ensisijainen tavoite on maadoitusjännitteiden pienentäminen.

Kaikkiaan kesän aikana mitattiin 513 muuntopiiriä, joista neljä on purettu mittausten jälkeen, ja yhdestä ei ole saatu luotettavaa tulosta. Myös rajatapaukset vähennettiin tarkastelun piiristä, jolloin tutkittavien muuntopiirien määrä oli 493. Asta-myrskyn takia neljä muuntopiiriä, jotka oli jo mitattu, rakennettiin uudestaan, jolloin myös niiden maadoitusresistanssi pitää mitata tulevana kesänä uudestaan. Nämä muuntopiirit on kuitenkin sisällytetty tulosten tarkasteluun.

Tarkastelun piiriin otettiin vuoden 2006 jälkeen mitatut tulokset, jolloin muuntopiirejä oli yhteensä 552 kappaletta. Liitteen 5 taulukossa vuosien 2006 – 2010 mittaustulokset on lajiteltu johtolähdöittäin eri maadoitusryhmien mukaan kappalemäärän ja suhteellisen lukumäärän perusteella. Mansikkalan ja Immalan asemien verrattain pienet mittaustulosten lukumäärät johtuvat Imatran laajasta maadoitusverkosta. Myös Immala ja Rajapatsas syöttävät kaupunkialueen laajaa maadoitusverkkoa, mutta muun muassa maaseudun johtolähdöt nostavat mitattujen muuntopiirien määrää.

Tuloksista nähdään, että Mansikkalan, Immalan ja Fortumin muuntopiirien osalta maadoitukset ovat melko hyvät, sillä maadoitusjännite ylittää arvon $2U_{TP}$ keskimääräisesti alle neljänneksessä muuntopiireistä. Paras tilanne on Fortumin kohdalla, jolla ei ole yhtään $4U_{TP}$ -arvon ylittävää tulosta. Näiden asemien syöttämällä muuntopiireillä maadoitusresistanssin mediaani on $1,4 \Omega$. Imatran alueen hyviä tuloksia selittävät muuntopiirien väliset maadoitusyhteydet ja niistä seuraava maadoitusverkon laajuus sekä liitteen 6 maaperäkartta, josta nähdään Imatran pintamaan koostuvan suurelta osin pienen resistiivisyyden omaavasta savesta.

Rajapatsaan tilannetta huonontavat maaseutua syöttävät Jäppilänniemen ja Linnansuon lähdöt, joissa muuntopiirit ovat verrattain pieniä eikä muuntopiirien välisiä maadoituksia ole yhdistetty. Linnansuon lähdöllä on vain yksi $4U_{TP}$ -arvon ylittävä tulos, mutta lähes 85 % ylittää arvon $2U_{TP}$, kun taas Jäppilänniemen lähdöllä on paljon sekä hyviä että todella huonoja arvoja. Tästä huolimatta Rajapatsaan syöttämistä muuntopiireistä $2U_{TP}$ -arvon alittaa reilut 50 % muuntopiireistä. Taulukon 7.1 mitoitusvirroilla laskettu suurin sallittu $2U_{TP}$ -arvo kaikilla Imatran sähköasemien johtolähdöillä on 3Ω , mistä johtuen hiukankin suuremmat maadoitusresistanssiarvot nostavat herkästi $2U_{TP}$ -arvon ylittävien muuntopiirien määrää.

Maaseutua ja haja-asutusalueita syöttävien Saarlammen, Vennonmäen ja Syyspohjan asemien muuntopiirien osalta tilanne on paljon huonompi. Muuntopiirien maadoitusverkot ovat usein kohtalaisen pieniä ja maaperä koostuu suurelta osin kalliomaasta, moreenista tai karkeasta hiedasta, kuten liitteestä 6

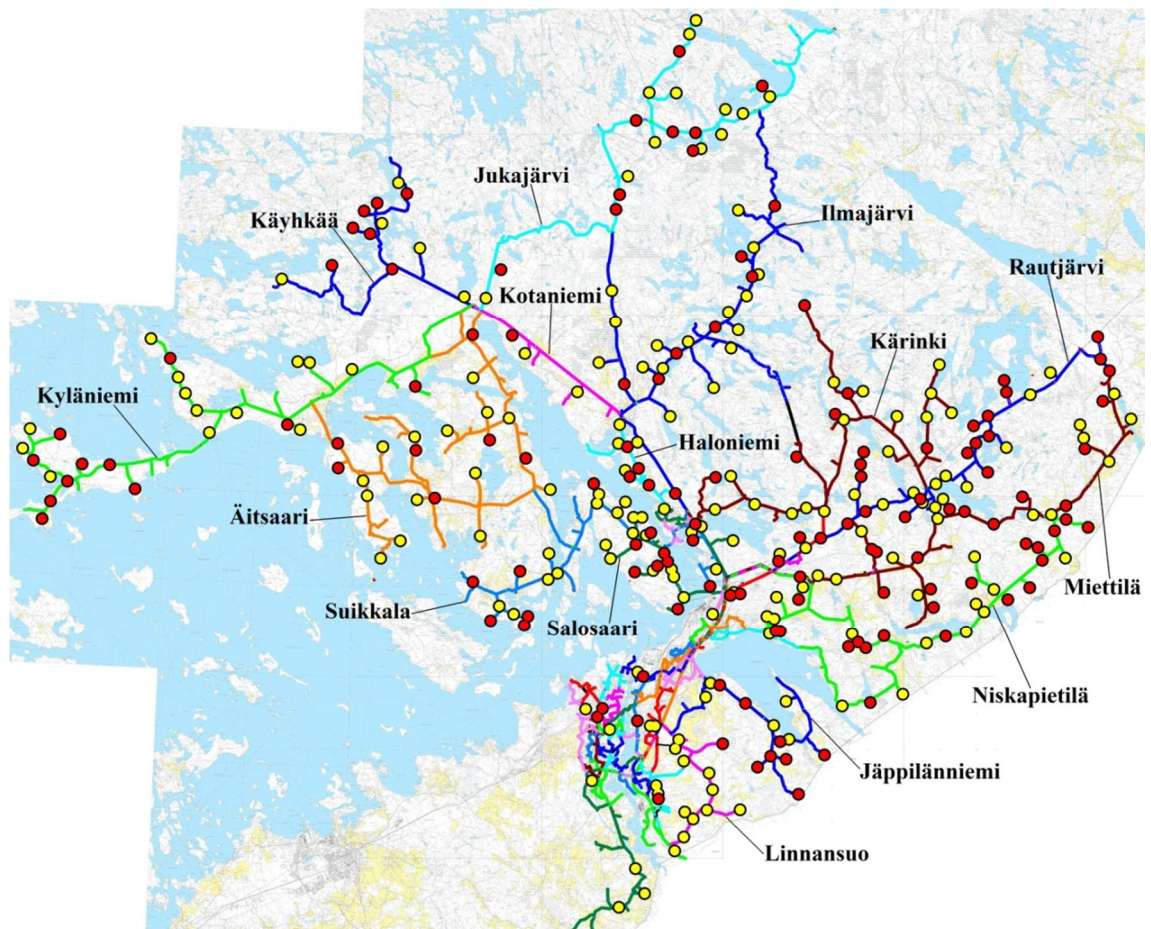
nähdään. Vaikka jakelualueen maaperästä ei ole tarkempaa karttaa ja maape-
rässä on paljon paikallista vaihtelua ensimmäistä ja toista Salpausselkää lukuun
ottamatta, antaa se käsityksen haja-asutusalueiden huonoista maadoitusolo-
suhteista. Taulukkoon 7.3 on koottu johtolähdöt, joissa yli puolet muuntopiirien
maadoitusjännitteestä ylittää arvon $2U_{TP}$.

Taulukko 7.3. Maadoitusjännitteen kannalta huonoimmat johtolähdöt

Sähköasema	Johtolähtö	$U_E > 2U_{TP}$		Maadoitusresistanssi (Ω)	
		(kpl)	(%)	ka.	mediaani
MA4	3 Suikkala	15	51,7	13,47	9,10
MA4	7 Haloniemi	8	66,7	20,27	12,55
MA4	8 Kärinki	20	58,8	21,15	9,85
MA4	9 Ilmajärvi	24	64,9	12,59	11,80
MA6	17 Jäppilänniemi	13	56,5	5,73	3,91
MA6	18 Linnansuo	11	84,6	4,14	3,67
MA7	2 Käyhkää	12	75	40,82	17,05
MA7	3 Jukajärvi	21	75	22,07	14,70
MA7	5 Kyläniemi	24	64,9	17,24	13,90
MA9	13 Rautjärvi	32	91,4	11,63	9,30
MA9	14 Niskapietilä	31	83,8	12,76	7,50
MA9	15 Lohela	3	75	8,14	7,60
MA9	16 Miettälä	27	71,1	8,85	6,35
MA9	18 Vennonmäki	2	66,7	4,99	5,20
MA9	19 Ruokolahti	5	62,5	6,12	5,86
MA9	21 Salosaari	17	77,3	10,51	6,90

Kappalemäärän lisäksi taulukossa on $2U_{TP}$ -arvon ylittävien muuntopiirien suh-
teellinen osuus kunkin johtolähdön kaikista mitatuista muuntopiireistä sekä
maadoitusresistanssin keskiarvo ja mediaani. Mediaani kuvaa paremmin maa-
doitusresistanssin arvoa erityisesti Vennonmäen ja Syyspohjan kohdalla, joissa
muutamit erittäin suuret mittaukselliset vääristävät keskiarvoa, kuten taulukos-
ta nähdään. Punaisella värjättyissä riveissä johtolähdön muuntopiireistä vain alle
neljännes alittaa arvon $2U_{TP}$. Näistä suurinta osaa syöttää Saarlammen sähkö-
asema. Vaikka maadoitusresistanssit ovat pieniä verrattuna Vennonmäen ja
Syyspohjan asemiin, suuresta maasulkuvirran tiukat maadoitusjännitevaatimuk-
set kasvattavat $2U_{TP}$ -arvon ylittävien muuntopiirien lukumäärää.

Kj-maadoitusjohtimen käytöstä huolimatta erittäin huonosti johtavilla alueilla saavutetaan harvoin vaatimukset täyttävä maadoitusjännitetaso. Syyspohjan uusi sähköasema on vaikuttanut verkon syöttötilanteeseen ja sitä kautta Vennonmäen maasulkuvirran suuruuteen. Maadoitusresistanssien mitoitusvirtana on kuitenkin käytetty molemmille asemille samaa arvoa kuin ennen uutta asemaa eivätkä vaatimukset ole näin ollen muuttuneet. Kuvassa 8.1 maadoitusjännite U_E ylittää arvon $2U_{TP}$ keltaisilla ja $4U_{TP}$ punaisilla ympyröillä merkityillä muuntopiireillä.



Kuva 7.1 Sallitun maadoitusjännitteen ylittävät muuntopiirit

Kuten kuvasta nähdään, sallitun maadoitusjännitteen ylittävät muuntopiirit ovat jakautuneet ympäri jakeluverkkoa. Saarlammen huono maadoitustilanne näkyy Rautjärven, Miettälän, Niskapietilän ja Salosaaren johtolähdöillä.

Standardi SFS 6001 suurjänniteasennukset määrittelee muuntopiirin maadoituksen rakenteelle lisäehtoja, kun maadoitusjännite $U_E \leq 5U_{TP}$ tai $2U_{TP} < U_E \leq 4U_{TP}$. Jälkimmäistä voidaan soveltaa, kun käytetään muuntamolle asennettavaa potentiaalinojausta tai käyttöpaikan eristystä. Myös jokaisessa pienjännitehaarassa tulee olla ainakin yksi standardin SFS 6000 mukainen maadoitus. Sanatarkasti tämä tarkoittaa myös tapauksia, joissa runkojohdosta lähtevillä vain yhden pylväsvälin mittaisilla johtohaaroillakin tulisi olla maadoitus. Tätä ei kuitenkaan vaadita kunhan välimatka johtohaarojen päästä lähimpään maadoitukseen ei ylitä 200 metriä (Karppinen 2011). Tämän nojalla mitatuista muuntopiireistä 32 täytti standardien vaatimukset, ja ne voitiin vähentää toimenpiteitä vaativien muuntopiirien joukosta.

Viisinkertaista U_{TP} -arvoa voidaan käyttää vain erityistapauksissa, joissa syötetään vain yhtä liittymää huonosti johtavalla alueella, jossa liittymän maadoituselektrodi suositellaan liitettäväksi rakennusten pääpotentiaalintasausjärjestelmään. Tätä menettelyä ei otettu tarkasteluun mukaan, koska tällaiset tapaukset ovat erittäin harvassa ja tällöin täytyisi varmistua myös liittymän maadoitusjärjestelmän rakenteesta.

Kaikkiaan toimenpiteitä vaativia muuntopiirejä oli 280 kappaletta. Näistä $4U_{TP}$ -arvon ylitti 137 ja alitti 143 muuntopiiriä. Näille muuntopiireille tutkittiin eri vaihtoehtoja maadoitusjännitteiden pienentämiseksi $U_E \leq 4U_{TP}$ -arvon mukaisten vaatimusten perusteella.

8 VAIHTOEHDOT MAADOITUSJÄNNITTEIDEN PIENENTÄMISEKSI

Maadoitusjännitteisiin ja niitä koskeviin vaatimuksiin voidaan vaikuttaa usealla eri tavalla. Maadoitusjännite on maasulkuvirran ja maadoitusresistanssin tulo, jolloin näitä tekijöitä pienentämällä voidaan laskea myös jännitteen arvoa. Maadoitusjännitevaatimuksiin voidaan taas vaikuttaa releasetteluja muuttamalla, jolloin maasulkuvirran kestosta riippuva jännitevaatimus kasvaa aikoja lyhennet-

täessä kuvaajan 2.5 mukaisesti. Mittaustulosten pohjalta tutkittiin eri vaihtoehtojen soveltuvuutta ISSOY:n jakeluverkon maadoitustilanteen parantamiseksi. Tarkoituksena oli löytää parhaat mahdolliset vaihtoehdot kustannusten, maadoitusjännitteiden ja jakeluverkon tulevaisuuden näkymien kannalta.

Ennen varsinaisten vaihtoehtojen soveltuvuutta maadoitusjännitteiden pienentämiseksi täytyi selvittää 200 m:n maadoitusehdon täyttyminen jokaisessa muuntopiirissä. Tämä seikka on merkityksellinen sekä standardin SFS 6000 luvun 801.411.4 vaatimuksen täyttymisen että standardin SFS 6001 luvun 9.4.3 mukaisen maadoitusjännitteen $U_E \leq 4U_{TP}$ -arvon käytön kannalta. Jokaiselle sähköasemalle laskettiin myös jälleenkytkennöistä aiheutuvat keskeytyskustannukset yhtälön 3.1 avulla vuosien 2005 – 2010 häiriötilastojen pohjalta, jotta voitiin tarkastella tiettyjen toimenpiteiden taloudellista kannattavuutta.

Taulukossa 8.1 on laskettu SFS 6000 standardin ehdon täyttämiseksi vaadittavat maadoitukset ja niistä aiheutuvat kustannukset sähköasemittain. Nämä kustannukset pätevät myös maasulkuvirran kompensoinnin yhteydessä, sillä siinä jakeluverkko pysyy maadoitusten osalta nykytilassaan.

Taulukko 8.1 Maadoitukset SFS 6000 –standardin vaatimuksen täyttämiseksi

Sähköasema	Lukumäärä	Kustannukset (€)
MA1 Mansikkala	2	1426
MA2 Immala	0 - 1	0 - 713
MA4 Vennonmäki	16 - 27	11406 - 19248
MA5 Fortum	3 - 4	2139 - 2852
MA6 Rajapatsas	7 - 11	4990 - 7842
MA7 Syyspohja	7 - 18	4990 - 12832
MA9 Saarlampi	13 - 22	9268 - 15684

Kustannusten laskemiseen on käytetty taulukon 8.3 PEN-johtimen maadoituksen ja vaakamaadoituselektrodin asentamisen yksikköhintoja. Nähdään, että jo SFS 6000 -standardin vaatimusten täyttäminen maadoitusten osalta vaatisi melko suuria investointeja. Suuret vaihteluvälit lukumäärissä ja kustannuksissa johtuvat verkkotietojärjestelmän ja rakennuskuvien poikkeavuuksista. Näissä tapauksissa hyvin usein rakennuskuvien maadoitukset eivät löytyneet vtj:n tie-

tokannasta. Myös edellä taulukoissa esitetyt vaihteluvälit johtuvat samasta seikasta.

8.1 Maasulkuvirran kompensointi

Maasulkuvirran arvoa voidaan pienentää kompensoinnilla. Keskitetty kompensointi myös pienentää jälleenkytkentöjen määrää ja tuo säästöjä vähentyneiden keskeytyskustannusten myötä. Tästä syystä aivan ensimmäiseksi tutkittiin maasulkuvirran keskitettyä kompensointia maadoitusjännitteiden pienentämiseksi, koska se on ainut ratkaisu, jolla voidaan vaikuttaa positiivisesti sekä keskeytyskustannusten kehitykseen että rakennettavien muuntopiirien maadoituskustannuksiin kaikilla sähköaseman johtolähdöillä.

Kompensointilaitteisto on kannattava jälleenkytkentöjen vähentämiseksi, kun sen hankinta- ja käyttökustannukset ovat pienempiä kuin keskeytysten vähentämisestä toteutuneet säästöt. Maadoitusjännitteitä pienentävänä tekijänä kompensoinnin ja muiden ratkaisujen kannattavuutta tarkasteltaessa täytyy huomioida myös aiheutuvat kustannukset maadoitusjännitteiden saattamisesta määräysten vaatimaan arvoon.

Keskeytyskustannukset lasketaan vuotuisina, jolloin vertailu toteutuneiden säästöjen ja aiheutuneiden kustannusten välillä tehdään laskemalla investointi- ja käyttökustannuksille annuiteetti, joka kertoo näistä aiheutuneet tasasuuruiset vuosikustannukset. Annuiteettikerroin ε lasketaan yhtälöllä 8.1. Investoinnin annuiteetti saadaan kertomalla kustannukset annuiteettikertoimella.

$$\varepsilon = \frac{p/100}{1 - \frac{1}{(1 + p/100)^t}} \quad (8.1)$$

missä

p = korkotaso prosentteina

t = investoinnin tarkastelu-aika vuosina. (Lakervi ym. 2008)

Kompensointilaitteiston investointihintana käytettiin 125 010 euroa, joka vastaa EMV:n vuoden 2011 yksikköhintaa. Annuiteettikertoimen laskennassa korkotasona pidettiin 6 %:a ja tarkasteluaikana 25 a. Näillä arvoilla investoinnin annuiteetiksi muodostui 9800 €/a.

Kompensointilaitteistosta aiheutuu investointikustannusten lisäksi myös käyttökustannuksia, jotka jakautuvat edelleen kunnossapitoon ja häviöihin. Kokonaisuudessaan kompensointilaitteisto koostuu tähtipisteen tekemiseksi tarvittavasta maadoitusmuuntajasta, itse kuristimesta ja sen säätäjästä, vikavirran resistiivistä komponenttia suurentavasta rinnakkaisvastuksesta, joka helpottaa relesuojauksen toteuttamista, sekä mahdollisesta suojarakennuksesta. Laitteiston yksinkertaisesta rakenteesta johtuen sen kunnossapito koostuu pääosin määräajoin tehtävistä tarkastuksista eikä aiheuta merkittäviä kustannuksia. Laitteisto on normaalitilassa tyhjäkäynnissä, jolloin suurimman osan energiasta vievät maadoitusmuuntaja sekä kuristin. 100 A:n kompensointilaitteiston maadoitusmuuntajan tyhjäkäyntiteho on 900 W. (Maviko 2011.) Kokonaisuudessaan laitteen arvioitiin ottavan noin 1,5 kW tehon. Kuormitettuna eli maasulussa laitteen teho on luonnollisesti huomattavasti suurempi, mutta vikojen lyhytaikaisuuden takia niitä ei ole huomioitu laskelmissa. Häviöistä aiheutuneet kustannukset ovat 60 €/MWh häviöenergian hinnalla noin 800 €/a. Näin ollen kompensointilaitteiston yhteenlaskettu annuiteetti oli 10 600 €/a.

Maadoitusjännitteitä pienentävänä tekijänä kompensointi oli vartenotettava vaihtoehto Saarlammen, Vennonmäen ja Syyspohjan asemien kohdalla, koska rajat ylittäviä muuntopiirejä oli niin paljon jokaisella sähköaseman johtolähdöllä. Näillä asemilla myös jälleenkytkennät muodostivat suuren osan keskeytyskustannuksista.

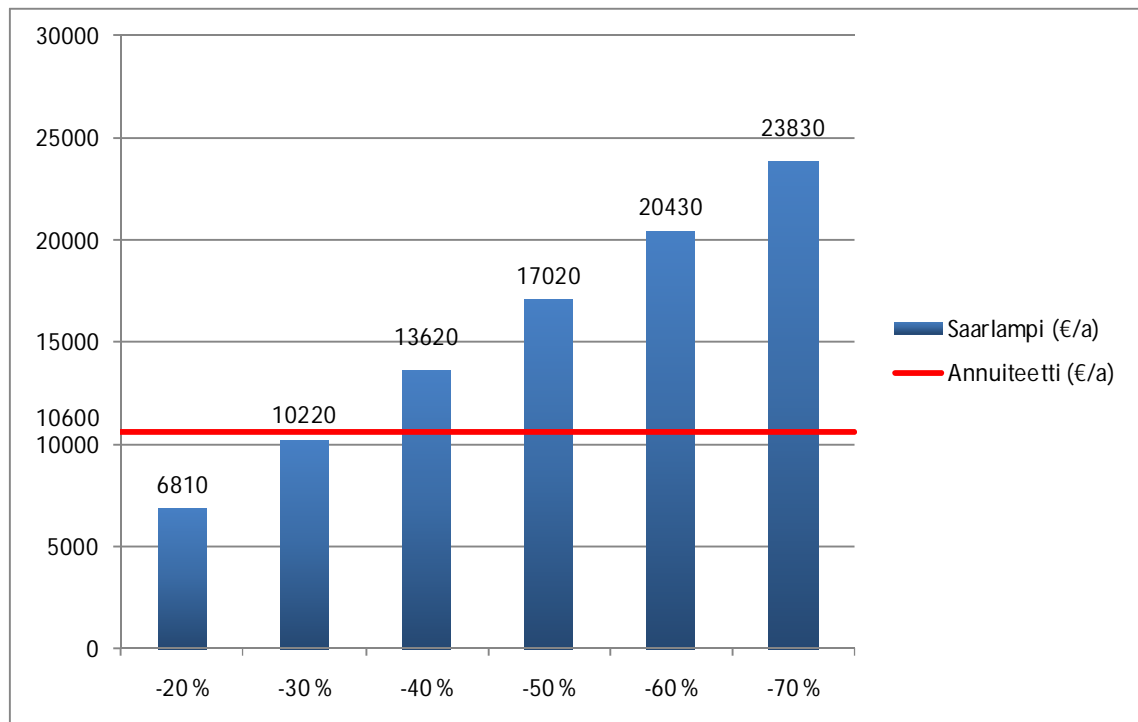
Syksyllä vuonna 2010 käyttöön otettu Syyspohjan sähköasema on otettu mukaan vasta vuoden 2011 tilastoihin, eikä tietoa aseman jälleenkytkennöistä saatu. Tämä huomioitiin laskemalla Vennonmäen pitkien keskeytysten lukumäärän keskiarvo sijainnin perusteella, jotta tiedetään millä johtolähdöllä kyseinen vika olisi nykyisessä verkossa ollut. Johtolähdön jälleenkytkentöjen lukumäärä saatiin kertomalla johtolähdön suhteellinen osuus keskeytyksistä sen lähdön jäl-

leenkytkennöillä, jolla se osa ennen oli. Tulokset ovat siis vain suuntaa antavia, eikä investointeja voi perustella näiden laskelmien perusteella. Laskelmat kuitenkin tehtiin, jotta saatiin karkea käsitys keskeytyskustannuksista ja kompensoinnin kannattavuudesta.

Kompensoinnin vaikutus jälleenkytkentöjen määrään vaihtelee hyvin paljon jakeluverkkojen rakenteesta johtuen. Tämän perusteella kompensoinnin kannattavuutta tarkasteltiin, kun se vähentää pikajälleenkytkentöjä asteittain. Merkitys aikajälleenkytkentöihin on huomattavasti pienempi, eikä mahdollisia muutoksia niiden lukumäärissä huomioitu laskelmissa.

8.1.1 Saarlammen sähköasema

Saarlammen sähköasemalle laskettiin kompensoinnin vaikutus keskeytyskustannusten vähenemiseen. Kuvaajassa 8.1 on esitetty laskennan tulokset.



Kuvaaja 8.1 Kompensoinnin vaikutus Saarlammen keskeytyskustannuksiin pjk:jen vähetessä asteittain

Lasketun annuiteetin arvoa kuvaajassa vastaa punainen suora. Nähdään, että kompensointi on kannattavaa, jos se vähentää pjk:jen määrää yli 30 %. Las-

kennallisesti säästöt ja annuiteetti ovat yhtä suuret 31 %:n tasolla, mikä on realistisesti saavutettavissa Suomessa saatujen kokemusten perusteella. Vuotuiset säästöt ulottuvat 3 000 ja 13 200 €:n välille, kun pjk:t vähenevät välillä 40 – 70 %.

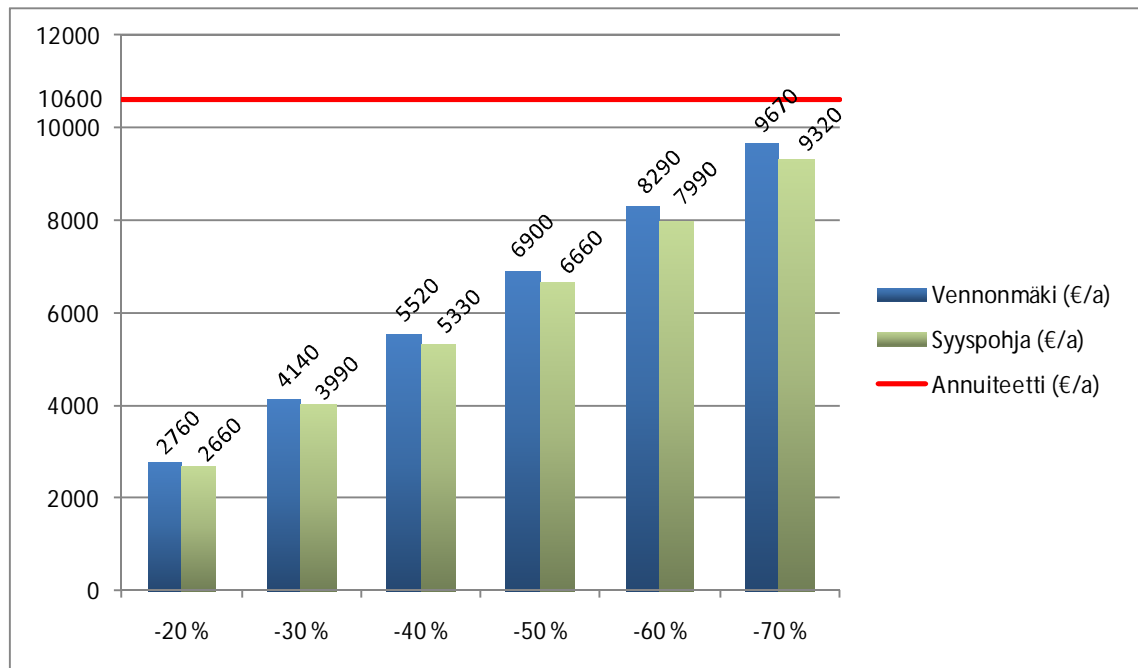
Näiden tulosten pohjalta keskitetty kompensointi osoittautui kannattavaksi investoinniksi jo pelkästään keskeytyskustannusten suhteen. Sillä saadaan myös muuntopiirien maadoitusjännitteet riittävän alhaiselle tasolle ilman muita lisätoimenpiteitä muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Tämän lisäksi kompensointi laskee tulevaisuudessa rakennettavien Saarlammen sähköaseman syöttämien muuntopiirien maadoituskustannuksia.

SFS 6000 -standardin vaatimuksen täyttämiseksi kustannuksia kertyy taulukon 8.1 mukainen summa. Kompensoinnin tuomat säästöt maksavat tämän summan takaisin reilussa viidessä vuodessa, kun oletetaan kompensoinnin vähentävän jälleenkytkentöjä 40 % ja maadoituskustannusten olevan täydet 15 680 €.

Saarlammen johtolähdöillä muuntopiirien 498 ja 401 mitatut maadoitusresistanssit ovat 157,1 Ω ja 105,6 Ω . Muuntopiiri 401 ei ollut tarkastelussa mukana, koska edellinen mittaustulos on ollut 8,7 Ω . Siksi se tulisi mitata uudestaan, jolloin tiedettäisiin oikea tulos. 498 taas on saneerattu vuoden 2010 lopulla, jolloin nykyinen maadoitusresistanssiarvo saadaan käyttöönottomittauksen yhteydessä. Tämän tarkastelun perusteella muuntopiirit eivät kuitenkaan täytä maadoitusjännitteelle asetettuja vaatimuksia, jos maasulkuvirran arvo on 10 A.

8.1.2 Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemat

Myös Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemille laskettiin keskeytyskustannuksista muodostuvat vuotuiset säästöt samoilla arvoilla kuin Saarlammen sähköasemalle. Kuvaajassa 8.2 on esitetty molempien sähköasemien kompensoinnilla saavutettavat säästöt keskeytyskustannuksissa.



Kuvaaja 8.2 Kompensoinnin vaikutus Vennonmäen ja Syyspohjan keskeytyskustannuksiin

Huomataan, että kummallakaan sähköasemalla kompensointi ei ole kannattava investointi keskeytyskustannusten suhteen. Syyspohjan asema on lyhentänyt Vennonmäen pitkät johtolähdöt lyhyempiin osiin ja laskenut niiden keskitehoa, mikä näkyy myös keskeytyskustannusten suuruudessa. Kun kustannuksia kertyy myös taulukon 8.1 mukaisesti SFS 6000 -standardin vaatimusten täyttämiseksi, osoittautuu kompensointi vieläkin kannattamattommaksi vaihtoehdoksi. Tämän lisäksi Vennonmäen syöttämällä muuntopiirillä 456 (306,8 Ω) sekä Syyspohjan syöttämällä muuntopiireillä 853 (90,5 Ω) ja 635 (374 Ω) maadoitusjännitteet eivät täytä maadoitusehtoja 10 A:n maasulkuvirralla.

8.2 Maasulkureleiden hidastusajat

Maadoitusjännitevaatimukseen ja sitä kautta vaadittavaan maadoitusresistanssiin voidaan vaikuttaa sähköasemien maasulkureleiden hidastusaikoja muuttamalla. Tällä tavoin saavutettava maadoitusjänniterajan kasvaminen on melko vaatimatonta, kuten kuvaajasta 2.5 nähdään. Hidastusaikoja myös pyritään pitämään mahdollisimman pitkinä, mikä antaa paremmat mahdollisuudet jälleenykyntöjen onnistumiselle. Näistä syistä johtuen releasettelujen muutoksia tarkasteltiin vain sellaisilla johtolähdöillä, joilla kasvanut maadoitusjänniteraja vai-

kutti suoraan rajan alittavien muuntopiirien lukumäärään ja jälleenkytkentöjen osuus keskeytyskustannuksista oli kohtuullisen pieni.

Releiden hidastusaikojen muuttaminen on edellä mainitut kriteerit täyttävillä johtolähdöillä hyvä keino vähentää maadoitusjänniterajan ylittävien muuntopiirien lukumäärää, sillä siitä ei aiheudu erityisiä kustannuksia ja muutokset voidaan tehdä esimerkiksi relekoestusten yhteydessä. Lyhyemmillä hidastusajoilla lisämaadoituksesta aiheutuneet kustannukset pienenevät, joten näiden yhdistelmää tutkittiin kaikilla potentiaalisilla johtolähdöillä.

8.2.1 Vennonmäen sähköasema

Vennonmäen asemalla Suikkalan, Käringin ja Ilmajärven johtolähtöjen maasulkureleiden ajk:n jälkeiseksi hidastusajaksi vaihdettiin 0,30 s, kun se ennen muutoksia oli noin 0,33 s. Muutokset pyrittiin pitämään maltillisina, jotteivät melko suuret jälleenkytkennöistä aiheutuneet keskeytyskustannukset nouse jälleenkytkentöjen muuttuessa pitkiksi keskeytyksiksi.

8.2.2 Imatran alueen sähköasemat

Imatran alueen sähköasemilla hidastusaikoja voitiin pienentää Vennonmäkeä enemmän, sillä jälleenkytkennöistä aiheutuneet keskeytyskustannukset ovat huomattavasti pienempiä. Taulukossa 9.1 on esitetty hidastusaikojen valinnassa käytettyjä tietoja niillä johtolähdöillä, joilla maadoitusjännitteet olivat liian suuria.

Taulukko 8.2 Hidastusajat ja niiden valinnassa käytetyt tiedot johtolähdöittäin

Sähköasema	Johtolähtö	Jälleenkytkennöistä aiheutuneet keskeytyskustannukset (€/a)		Vikataajuudet (1/a)		Maasulkureiden hidastusajat (s)		
		PJK	AJK	PJK	AJK	Ennen jälleenkytkentöjä	PJK:n jälkeen	AJK:n jälkeen
						Vakio/muutettu	Vakio/muutettu	Vakio/muutettu
MA1	12 Karhumäki	2296	1984	3,50	1,50	0,255	0,319	0,380
MA1	18 Korvenkanta	706	97	2,67	0,17	0,254	0,283	0,352
MA2	6.4 Kurkvuori	286	191	1,50	0,50	0,151	0,186	0,398/0,300
MA2	5 Rautio	1803	1258	4,33	1,50	0,293	0,327	0,360
MA2	9 Rämö	1299	597	2,17	0,50	0,298	0,340	0,348
MA5	1 Räikkölä	1707	899	5,67	1,50	0,204	0,249	0,370/0,300
MA6	2 Teppanala	212	0	0,50	0,00	0,303/0,300	0,294	0,371/0,300
MA6	3 Pietarintie	699	0	2,25	0,00	0,292	0,288	0,365
MA6	13 Itä-Siitola	206	0	0,75	0,00	0,305/0,300	0,287	0,365/0,300
MA6	15 Mehiläismäki	627	0	1,00	0,00	0,307/0,300	0,292	0,370/0,300
MA6	17 Jäppilänniemi	2579	821	11,00	1,75	0,299	0,290	0,366/0,300
MA6	18 Linnansuo	773	136	5,75	0,50	0,306/0,300	0,289	0,367/0,300

Imatran alueen sähköasemilla hidastusaikojen muutokset painottuivat Rajapat- saan sähköaseman johtolähdöille, koska niissä oli lukumääräisesti eniten rajat ylittäviä muuntopiirejä ja jälleenkytkennöistä aiheutuneet keskeytyskustannukset olivat pieniä. Samalla perusteella muutettiin myös Kurkvuoren ja Räikkölän lähtöjen arvoja. Hidastusaikoja ei muutettu, mikäli keskeytyskustannukset olivat suuria tai niillä ei saavutettu merkittävää lisämaadoituksesta aiheutuvien kustannusten pienentämistä.

8.3 Maadoitusresistanssien pienentäminen

Maadoitusresistansseja saadaan pienennettyä asentamalla muuntopiireihin lisää maahan yhteyden muodostavia maadoituselektrodeja sekä yhdistämällä muuntopiirejä toisiinsa pj-yhteyksien ja erityisten kj-pylväisiin asennettavien maadoitusjohtimien välityksellä.

Eryttypisten elektrodien rakennuttamisesta aiheutuvat kustannukset haettiin energia- ja telealan toimijoille palveluja tarjoavan HeadPowerin tietokannasta. Taulukossa 8.3 on esitetty tarkastelussa käytettyjen rakenteiden yksikkökustannukset. Tarkastelusta jätettiin pois pystymaadoitus jakeluverkon huonon maaperän ja siitä seuraavan vaikean asentamisen takia. Pystymaadoituksella saavutettava maadoitusresistanssi on myös keskimäärin yli kolminkertainen vaakamaadoitukseen verrattuna, joskin saavutettava resistanssiarvo on huomatta-

vasti vakaampi. Potentiaalinhjausrenkaan asentaminen on mukana, koska se on ehtona maadoitusjännitteen $U_E \leq 4U_{TP}$ -arvon käytölle.

Taulukko 8.3 Maadoitusrakenteiden yksikkökustannukset

Maadoitusrakenne	Työ (€)	Tarvikkeet (€)	Yhteensä (€)
Pylväsmuuntamon potentiaalinhjausrenkaan jälkiasennus	55,4	47,6	103,0
Vaakamaadoituselektrodin asentaminen	73,0	522,2	595,2
PEN-johtimen maadoituksen asentaminen	34,0	83,7	117,7
Maadoituksen siirtosarja 60 m (ei sisällä maadoituselektrodia tai sen asentamista)	85,0	193,4	278,4

Yhden pj-maadoituksen kustannus koostuu taulukon vaakamaadoituselektrodin ja PEN-johtimen maadoituksen asentamisen mukaisista summista. PEN-johtimen maadoituksen asentaminen sisältää maadoitusjohtimen asennuksen, kiinnityksen ja suojauksen pylvääseen sekä kytkennän PEN-johtoon. Vaakamaadoituselektrodin asentaminen koostuu ojan kaivamisesta, elektrodin asentamisesta ja peittämisestä sekä maadoitusjärjestelmään kytkemisestä. Vaakamaadoituselektrodin suuret tarvekustannukset johtuvat pitkälti maahan asennettavasta 20 m pitkstä kuparisesta 25 mm²:n poikkipinta-alaisesta maadoituselektrodista. Muissa tapauksissa työt käsittävät kaiken, mitä tarvitaan komponenttien asentamiseen ja kytkemiseen osaksi maadoitusjärjestelmää. Yli 60 metrin etäisyyksillä taulukon kustannus maadoituksen siirtosarjalle ei enää päde. Tällöin kustannukset laskettiin tapauskohtaisesti yksikköhintojen perusteella, jolloin rakentamiskustannukseksi muodostui noin 3,8 €/m.

Maadoituksen siirtosarjalla muuntopiirien yhdistäminen tulee siis kalliimmaksi yli 180 metrin eli noin kolmen pylväsvälin etäisyyksillä kuin pj-maadoituksen asentaminen. Muuntopiirien yhdistäminen on kuitenkin kannattavaa, kun yhdenkin muuntopiirin maadoitusresistanssi on pieni, johon liittämällä muiden rajan ylittävien muuntopiirien arvot saadaan pienenemään.

Maadoitusresistanssien pienentämiseksi tarkastelussa käytettiin 1 – 3 maadoituselektrodia mitatun maadoitusresistanssin suuruudesta riippuen. Valtaosassa muuntopiireistä oletettiin yhden elektrodin riittävän vaaditun maadoitusresistanssitason alittamiseksi. Mikäli muuntopiiri ei täyttänyt standardien vaatimuksia ja maadoitusjännite ylitti sallitun rajan, tarvittavat elektrodit laskettiin sijoitettavaksi kyseisille haaroille, jolloin tarvittavien elektrodien lukumäärää saatiin vähennettyä. Samalla periaatteella standardien vaatimusten täyttämiseksi asennettavien maadoitusten lukumäärä vähennettiin maadoitusresistanssien pienentämiseksi asennettavien elektrodien lukumäärästä.

Lisämaadoitusten asentamista tarkasteltiin sellaisilla johtolähdöillä, joilla vain osa muuntopiireistä vaati toimenpiteitä tai muut vaihtoehdot eivät osoittautuneet kannattaviksi. Käytännössä tämä tarkoitti Imatran alueen sähköasemia. Kuitenkin myös Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemille laskettiin lisämaadoituksista aiheutuva kustannus, koska keskeytyskustannusten laskelmissa ei ollut käytössä oikeita vikatietoja, eivätkä keskeytyskustannusten muutokset osoittaneet pelkkää kompensointia kannattavaksi.

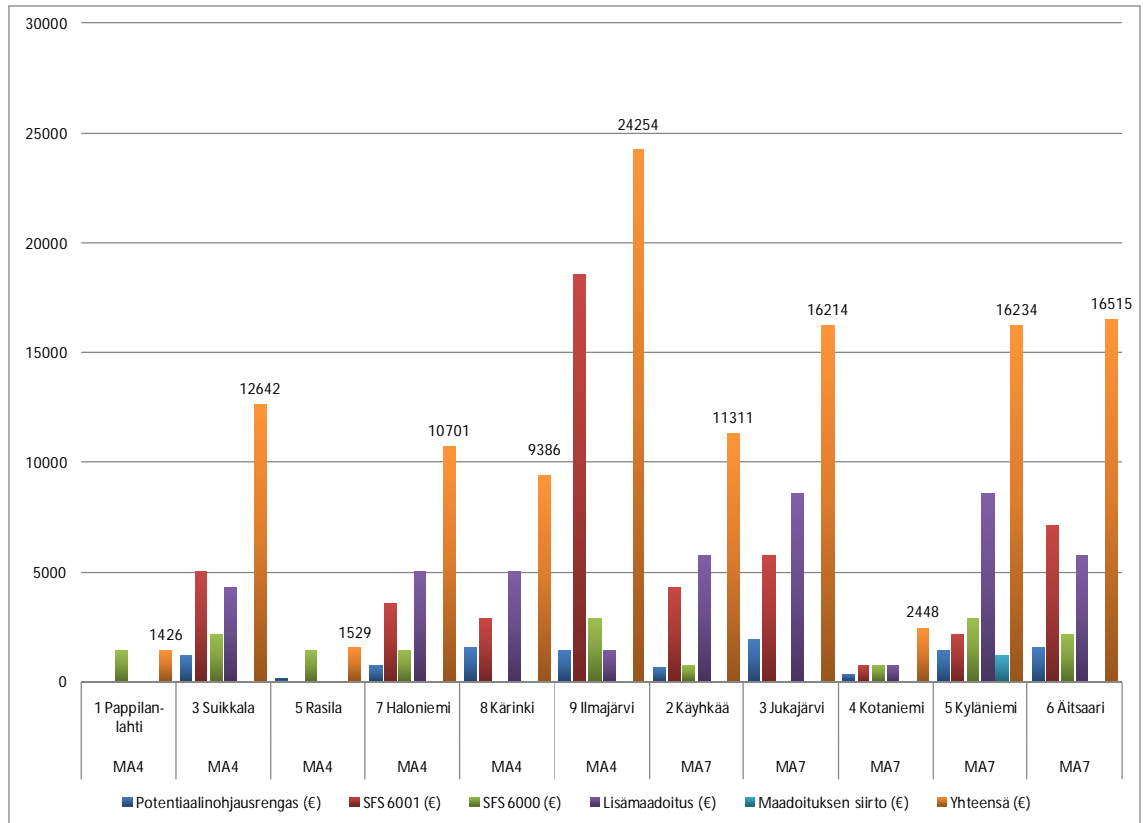
8.3.1 Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemat

Vennonmäen ja Syyspohjan maadoituskustannukset laskettiin yhdessä releasettelujen kanssa, jolloin kokonaiskustannukset pieneivät hieman. Taulukossa 8.4 on esitetty tarvittavien komponenttien lukumäärät johtolähdöittäin, kun käytetään luvun 8.2.1 mukaisia hidastusaikoja.

Taulukko 8.4 Tarvittavien rakenteiden lukumäärät Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien johtolähdöillä

Johtolähtö	Potentiaalinojhausringas (kpl)	Maadoitukset (kpl)			Maadoituksen siirto (m)
		SFS 6001	SFS 6000	Lisä	
MA4 1 Pappilanlahti	0	0	2	0	0
MA4 3 Suikkala	12	5 - 7	2 - 3	6	0
MA4 5 Rasila	1	0	1 - 2	0	0
MA4 7 Haloniemi	7	2 - 5	1 - 2	7	0
MA4 8 Kärinki	15	2 - 4	0	7	0
MA4 9 Ilmajärvi	14	19 - 26	3 - 4	2	0
MA7 2 Käyhkää	6	5 - 6	1	8	0
MA7 3 Jukajärvi	19	3 - 8	0	12	0
MA7 4 Kotaniemi	3	1	0 - 1	1	0
MA7 5 Kyläniemi	14	3	0 - 4	12	320
MA7 6 Äitsaari	15	10	1 - 3	8	0

Taulukon 8.4 mukaisten SFS 6000 -standardin vaatimuksen täyttämiseksi rakennettavien maadoitusten pienempi lukumäärä verrattuna taulukon 8.1 arvoihin johtuu siitä, että SFS 6001 -standardin lisävaatimus maadoitusten määrään on tiukempi kuin SFS 6000 -standardin, kun maadoitusjännitte $U_E > 4U_{TP}$. Tällöin osa taulukon 8.1 maadoituksista on korvattu taulukon 8.4 SFS 6001 -sarakkeen maadoituksilla. Taulukon arvojen pohjalta laskettuja maadoituskustannuksia molempien sähköasemien tapauksessa havainnollistaa kuvaaja 8.3. Laskelmissa käytettiin taulukon suurimpia arvoja.



Kuvaaja 8.3 Maadoituksista aiheutuvat kustannukset Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien johtolähdöllä

Muuntopiirien välistä yhdistämistä käytettiin vain Kyläniemen lähdöllä noin 320 metrin matkalla. Muissa verkon osissa se ei osoittautunut kannattavaksi pitkien välimatkojen takia. Hyvin usein myös potentiaalisissa kohteissa muuntopiirit oli jo yhdistetty toisiinsa joko pj- tai kj-yhteyksien välityksellä.

Vennonmäen maadoituksista aiheutuva kustannus on 59 940 € ja Syyspohjan 62 720 €. Molemmissa tapauksissa lisämaadoitukset muodostavat huomattavan osan kustannuksista. Myös SFS 6001 -standardin vaatimuksen täyttämiseksi asennettavat maadoitukset vaikuttavat merkittävästi lopullisiin kustannuksiin erityisesti Ilmajärven johtolähdöllä. Vaikka lähes 72 % Vennonmäen ja Syyspohjan syöttämistä muuntopiireistä vaatii potentiaalinhajauselektrodin, vastaa niistä aiheutunut kustannuserä vain vajaata 9 %:a kokonaiskustannuksista.

Taulukosta nähdään, että standardien vaatimusten täyttämiseksi vaadittavat maadoituskustannukset muodostavat suuren osan kokonaiskustannuksista, jolloin lisämaadoitusten osuus pienenee huomattavasti. Haloniemen, Käringin,

Käyhkään, Jukajärven ja Kyläniemen johtolähdöillä lisämaadoituskustannukset ovat suuremmat kuin standardien vaatimusten täyttämisestä aiheutuneet menot. Erityisen suuriksi ne muodostuvat Ilmajärven johtolähdöllä. Toisaalta tällöin lisämaadoitusten tarve oletettavasti vähenee.

Maasulkureleiden hidastusaikoja lyhennettiin vain Vennonmäen tapauksessa. Syyspohjan asemalla arvo oli kaikilla johtolähdöillä noin 0,25 s, eikä niitä lyhennetty entisestään mahdollisesti kasvavien keskeytyskustannusten takia.

8.3.2 Imatran alueen sähköasemat

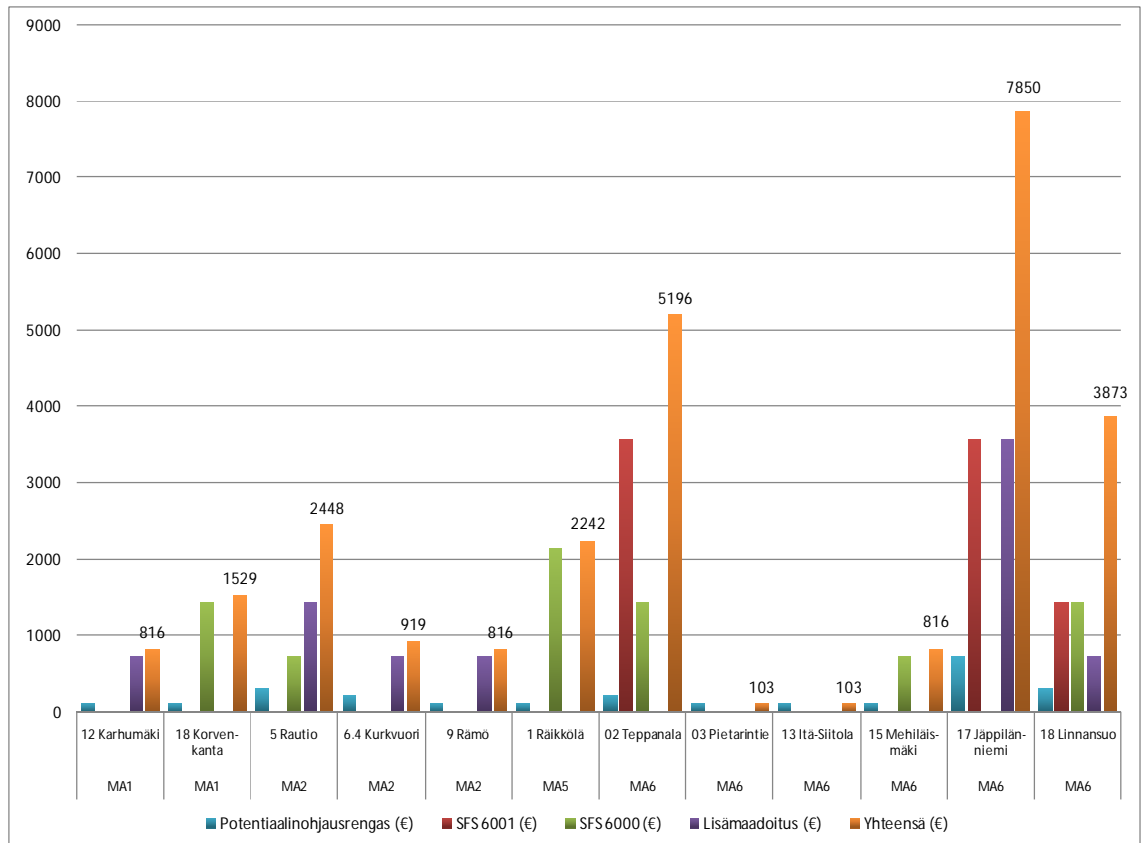
Imatran alueella Mansikkalan, Immalan, Fortumin ja Rajapatsaan sähköasemilla selvittää huomattavasti pienemmällä kustannuksella muuntopiirien välisten pjjakorajojen muodostamien laajempien maadoitusverkkojen ja paremman maaperän ansiosta. Taulukossa 8.5 on esitetty tarvittavien komponenttien lukumäärät.

Taulukko 8.5 Tarvittavien rakenteiden lukumäärät Imatran alueen sähköasemien johtolähdöillä

Johtolähtö	Potentiaalinojauksen rengas (kpl)	Maadoitukset (kpl)		
		SFS 6001	SFS 6000	Lisä
MA1 12 Karhumäki	1	0	0	1
MA1 18 Korvenkanta	1	0	2	0
MA2 5 Rautio	3	0	0-1	2
MA2 6.4 Kurkvuori	2	0	0	1
MA2 9 Rämö	1	0	0	1
MA5 1 Räikkölä	1	0	2-3	0
MA6 02 Teppanala	2	5	2	0
MA6 03 Pietarintie	1	0	0	0
MA6 13 Itä-Siitola	1	0	0	0
MA6 15 Mehiläismäki	1	0	1	0
MA6 17 Jäppilänniemi	7	3-5	0	5
MA6 18 Linnansuo	3	1-2	0-2	1

Maadoituksen siirto ei osoittautunut tarpeelliseksi Imatran taajama-alueella, koska muuntopiirit muodostavat lähes poikkeuksetta yhteyksiä toisiinsa jakorajojen kautta. Hyvin usein myös haja-asutusalueilla muuntopiirejä on yhdistetty kjojohtojen välityksellä. Muissa tapauksissa etäisyydet lähimpiin muuntopiireihin

olivat niin suuria, ettei muuntopiirien yhdistäminen olisi ollut kannattavaa. Kuvaajassa 8.4 on esitetty lasketut maadoituskustannukset johtolähdöittäin. Myös tässä tapauksessa kustannuslaskelmissa on käytetty taulukon 8.5 suurimpia arvoja.



Kuvaaja 8.4 Maadoituksista aiheutuvat kustannukset Imatran alueen sähköasemien johtolähdöillä

Yhteensä Imatran alueen maadoituskustannukset ovat 26 710 euroa, joista suurimman osan muodostavat Jäppilänniemen, Linnansuon ja Teppanalan johtolähdöt. Lisämaadoitusten osuus kokonaiskustannuksista on vajaa 30 prosenttia.

Ilman releasetteluja kustannukset nousisivat 2 350 euroa. Luku ei ole kovin suuri kokonaiskustannuksiin suhteutettuna, mikä johtuu osittain standardien vaatimusten täyttämiseksi rakennettavien maadoitusten suuresta lukumäärästä.

8.4 Herkkyysanalyysi

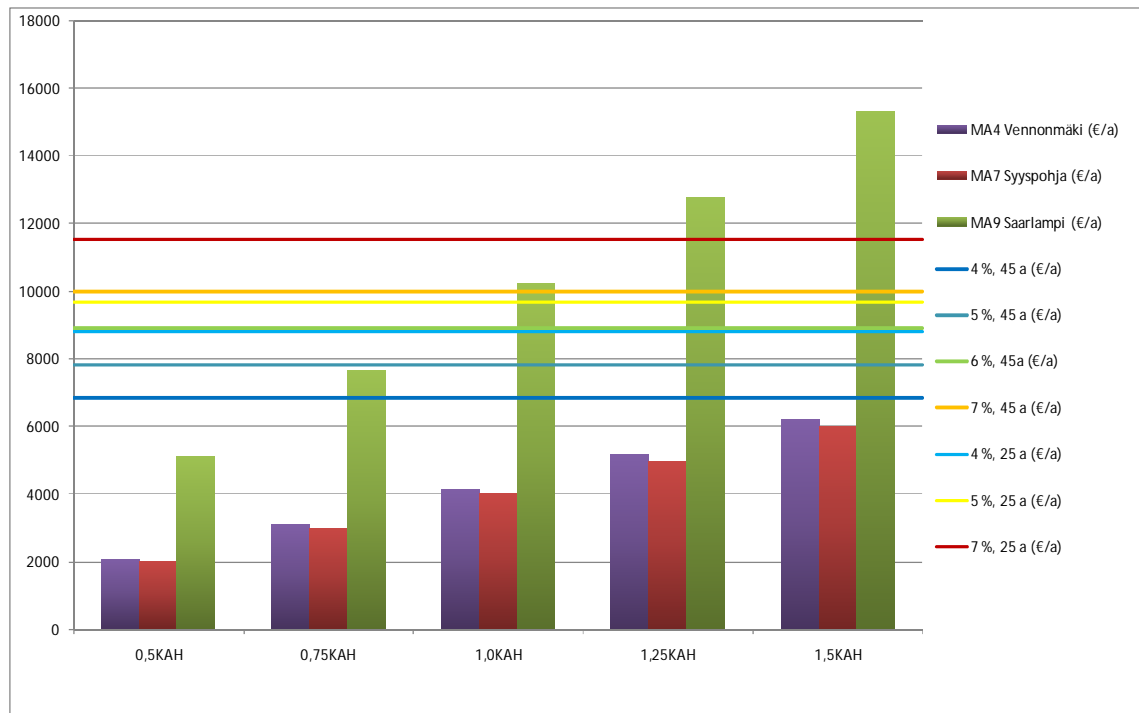
Tehdyissä laskelmissa on monia epävarmuustekijöitä, joilla on suuri merkitys siihen, vastaavatko laskelmat todellisuutta tai osoittautuuko kompensointilaitteiston investointi kannattavaksi vai ei. Perusteltujen investointien ja maadoitusjännitteiden pienentämiseksi valittavan parhaan vaihtoehdon tekemisen kannalta on tärkeä tiedostaa eri tekijöiden vaikutus laskelmiin ja niiden pohjalta tehtyihin päätöksiin. Tässä työssä tehtyihin laskelmiin sisältyy poikkeuksellisen paljon tekijöitä, joilla voi olla hyvin suuri merkitys laskelmien lopputuloksiin.

8.4.1 Maasulkuvirran kompensointi

Kompensoinnin kannattavuustarkastelun suhteen tärkeimpiä tekijöitä ovat annuiteetin laskennassa käytetyt korkotasot ja pitoajat sekä keskeytyskustannusten määrittämiseen käytetyt KAH-arvot ja vikatietojen oikeellisuus.

Annuiteetti laskettiin 6 %:n korkotasolla ja 25 a:n pitoajalla riittävän marginaalin saavuttamiseksi, jotteivät laskelmat ohjaisi tekemään kannattamattomia investointeja. Pitoajan kasvaessa annuiteetti pienenee ja keskeytyskustannuksista saatavien säästöjen summa kasvaa. Korkotasolla on päinvastainen ja huomattavasti merkittävämpi vaikutus annuiteetin arvoon.

Myös KAH-arvojen merkitys on huomattava. KAH-arvojen kehityssuunta on ylöspäin, mutta toisaalta asiakasryhmäkohtaisiin arvoihin siirtyminen pienentäisi Vennonmäen ja Syyspohjan keskeytyskustannuksia, koska kulutus koostuu pääasiassa kotitalouksista. Myös Saarlammen tapauksessa vaikutus olisi hyvin samantapainen. Kuvaajassa 8.5 on esitetty kompensoinnin kannattavuutta Saarlammen, Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemilla erilaisilla suhteellisilla KAH-arvoilla ja annuiteeteilla, kun kompensointi vähentää pjk:jen määrää 30 %.



Kuvaaja 8.5 Kannattavuustarkastelu erilaisilla KAH-arvoilla ja annuiteeteilla, kun kompensointi vähentää pjk:jen määrää 30 %.

Kuvaajasta nähdään eri muuttujien vaikutus kannattavuuslaskelmiin. Saarlammen sähköasemalla nykyisillä KAH-arvoilla ja 45 a:n pitoajalla kompensointi on kannattavaa vielä 7 %:n korkotasolla. Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemilla edes alhaisin annuiteetti ei riitä 1,5-kertaisilla KAH-arvoilla.

Tämän lisäksi Vennonmäen ja Syyspohjan vikatiedot perustuvat karkeisiin arviointeihin jälleenkytkentöjen määristä, jolloin myöskään niiden perusteella lasketuille tuloksille ei voi antaa kovin suurta painoarvoa, mikä kasvattaa entisestään laskelmien epäluotettavuutta. Laskelmat tulisivatkin tehdä uudestaan näiden sähköasemien kohdalla muutaman vuoden päästä, kun tiedetään todelliset jälleenkytkentämäärät.

8.4.2 Releasettelut

Hidastusaikojen lyhentämisen vaikutusta onnistuneiden jälleenkytkentöjen lukumäärään on hyvin vaikea arvioida. Onnistuneiden jälleenkytkentöjen lukumääriä on tarkkailtava, jos hidastusaikoja lyhennetään. Mikäli merkitys jälleenkytkentöjen onnistumiselle on tarpeeksi suuri, voi ratkaisu osoittautua kannat-

tamattomaksi, sillä tällöin vähentyneinä maadoituskustannuksina saadut säästöt aiheuttavat suurempia vuotuisia keskeytyskustannuksia. Siksi optimaalisten hidastusaikojen valinnassa voitaisiin käyttää apuna maasulkureleistä saatavaa tietoa, joka kertoo millä ajanhetkellä jälleenkytkentä on onnistunut. Tässä työssä hidastusajat on kuitenkin valittu puhtaasti keskeytyskustannusten ja kasvien maadoitusjänniterajojen perusteella. Joka tapauksessa hidastusaikojen valinta on kompromissi eri tekijöiden välillä, eikä kustannustehokkain ja paras ratkaisu välttämättä löydy helposti.

8.4.3 Maadoitukset

Lisämaadoituselektrodin vaikutus muuntopiirin maadoitusresistanssiin on tapauskohtaista erilaisten maaperien ja muuntopiirin rakenteiden vuoksi ja siksi hyvin vaikea arvioida. Lisämaadoituksia vaativilla kohteilla laskelmissa käytettiin yhdestä kolmeen maadoituselektrodia vaaditun tason saavuttamiseksi mitatun maadoitusresistanssin suuruudesta riippuen. Tämä arvio voi poiketa todellisudessa tarvittavasta määrästä molempiin suuntiin, mikä heikentää kustannuslaskelmien luotettavuutta. Mikäli lasketuilla elektrodimäärillä ei saada maadoitusjännitteitä riittävän alhaiselle tasolle, voivat kustannukset nousta huomattavasti.

Verkkotietojärjestelmän ja arkistoitujen urakointikuvien välillä on eroja maadoitusten lukumäärissä, mikä voi myös vaikuttaa kokonaiskustannuksiin merkittävästi. Parhaassa tapauksessa maastosta löytyvät maadoitukset laskevat maadoitusten tarvetta ja sitä myötä myös kustannuksia. Lukujen 8.3.1 ja 8.3.2 laskelmissa Vennonmäellä kustannukset voivat vähentyä parhaimmillaan 12 830 €, Syyspohjan tapauksessa 9 270 € ja Imatran alueella 4 990 €.

Näiden lisäksi ongelmallisia maadoitusten lukumäärän suhteen ovat ne mittaus tulokset, jotka ylittävät tai alittavat sallitun rajan niukasti. Jo lähtökohtaisesti käännepistemenetelmä antaa hieman todellista suurempia maadoitusresistanssin arvoja, jolloin tarkastelussa toimenpiteitä vaativana käsitelty muuntopiiri saattaa alittaa sallitun rajan, eikä se näin ollen vaatisi ylimääräisiä toimenpiteitä. Liian suuria arvoja voi aiheuttaa myös mittaus epäsuotuisessa maaperässä, vaikka mittaus pyrittiinkin tekemään aina parhaasta mahdollisesta pisteestä.

Mittauskäyrien tulkintavirheet voivat myös näkyä turhien toimenpiteiden lukumäärässä tai niiden puuttumisena.

9 TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Saarlammen sähköaseman tapauksessa löydettiin varteenotettava vaihtoehto maadoitusjännitteiden pienentämiseksi. Vennonmäen ja Syyspohjan sekä Imatran alueen sähköasemilla tilanne ei ole läheskään yhtä selkeä epävarmuustekijöistä johtuen.

9.1 Maasulkuvirran kompensointi Saarlammien sähköasemalla

Maasulkuvirran kompensointi Saarlammien sähköasemalla osoittautui kannattavaksi investoinniksi jo keskeytyskustannusten pienenemisen vuoksi, kun oletettiin kompensoinnin vähentävän pikajälleenkytkentöjen lukumäärää vähintään reilut 30 %. Se ratkaisee myös liian suurista maadoitusjännitteistä aiheutuvan ongelman ilman lisäkustannuksia muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta.

9.2 Imatran alueen sähköasemat

Imatran alueella selvitetään kohtuullisilla kustannuksilla, kun maasulkureleiden hidastusaikojen lyhentämistä käytetään yhdessä lisämaadoitusten rakentamisen kanssa. Jälleenkytkennöistä aiheutuneet keskeytyskustannukset ovat pieniä, eivätkä maadoitusjännitteet ole kovin suuria, jolloin keskitetty kompensointi ei ole millään muotoa perusteltu vaihtoehto.

Toisaalta tulevaisuudessa mahdollisesti kasvava paine säävarman maakaapelin käyttöön sähköjakelessa voi muuttaa maasulkuvirtojen arvoja merkittävästi, jolloin myös maadoitusjännitteet kasvavat, eikä lisämaadoitusten asentamisella enää saavuteta riittävän alhaisia maadoitusjännitteitä, ja investointi osoittautuu turhaksi. Myös paljon yleistynyt pienjänniteverkkojen maakaapelointi tekee ilmajohtoverkon maadoituksista turhia, mikä sekin vaikuttaa merkittävästi investoin-

nin kannattavuuteen. Nämä tekijät vaikeuttavat huomattavasti toimenpiteen valintaa. Tulosten perusteella lisämaadoitusten rakentaminen on kuitenkin yksi varteenotettava vaihtoehto.

9.3 Lisätutkimukset Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemilla

Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemille laskettiin sekä kompensoinnista että lisämaadoitusten asentamisesta aiheutuvat kustannukset. Vähentyneiden keskeytyskustannusten kannalta kompensointi ei osoittautunut kannattavaksi. Laskelmia tehtäessä ei ollut käytössä todellisia vikatietoja vaan laskentaan käytettiin teoreettisia arvoja. Tämä vaikuttaa saatujen tulosten luotettavuuteen merkittävästi, eikä niille voi antaa kovin suurta painoarvoa.

Arviot lisämaadoituksista aiheutuvista kustannuksista voivat muuttua hyvinkin paljon luvun 8.4.3 seikoista johtuen. Toisaalta standardien vaatimusten mukaisen maadoitusten lukumäärän pienentyessä lisämaadoitusten lukumäärä saattaa nousta samassa suhteessa, millä ei ole näin ollen suurta merkitystä kokonaiskustannuksiin, vain niiden suhteelliset osuudet muuttuvat.

Maadoitusjännitteiden pienentäminen vaaditulle tasolle lisämaadoituksia rakentamalla on myös hyvin suuri ja kallis investointi riippumatta siitä, millä aikavälillä se päätettäisiin tehdä, eikä tällä menettelyllä saada pienennettyä tulevaisuudessa rakennettavien muuntopiirien maadoituskustannuksia. Kuten Imatran alueen sähköasemien kohdalla, myös Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien johtolähtöjen mahdollisesti muuttuvat maakaapelointiasteet sekä pj- että kj-verkkojen osalta saattavat muuttua lähitulevaisuudessa huomattavasti, jolloin tehtävät lisämaadoituksista aiheutuvat kustannukset voivat osoittautua täysin turhiksi. Kun huomioidaan vielä, että molemmilla sähköasemilla laskennalliset maadoituskustannukset ovat pahimmassa tapauksessa noin puolet kompensointilaitteiston yksikköhinnasta, ei lisämaadoitusten rakentaminen ole kovinkaan perusteltua.

Näiden syiden takia olisi tarpeellista tehdä uudelleenarviointi kompensoinnin kannattavuudesta muutaman vuoden kuluttua, kun tiedetään sähköasemien

todelliset vikatiedot ja mahdollisesti muuttunut käytäntö maakaapeloinnin rakentamisen suhteen. Samalla laskettaisiin lisämaadoituksista aiheutuvat kustannukset uudelleen, kun maadoitusten lukumäärä tiedetään maastotarkastuksista saatujen tietojen perusteella, jolloin vertailu kahden vaihtoehdon välillä tehtäisiin ajantasaisilla tiedoilla. Mikäli Saarlammen sähköasemalle päädytään rakentamaan kompensointilaitteisto ja Imatran alueella rakennetaan lisämaadoituksia, voisi niistä saaduilla kokemuksilla olla ohjaava vaikutus myös Vennonmäen ja Syyspohjan toimenpiteiden valinnassa.

9.4 SFS 6000 -standardin vaatimusten täyttäminen

Taulukossa 8.1 on laskettu SFS 6000 -standardin täyttämiseksi rakennettavien maadoitusten lukumäärät ja kustannukset. Nämä pätevät myös siinä tapauksessa, että kyseiselle sähköasemalle rakennetaan kompensointilaitteisto. Esimerkiksi Saarlammen tapauksessa kompensointilaitteiston lisäksi kustannuksia muodostuisi 9 270 – 15 680 €.

Jos maadoitusjännitteitä pienennetään lisämaadoituksilla, kuten Vennonmäen, Syyspohjan tai Imatran alueen sähköasemilla, eivät taulukon 8.1 arvot enää päde, vaan kustannustarkasteluissa lasketut arvot sisältävät myös SFS 6000 -standardin vaatimuksen mukaiset maadoitukset.

9.5 Maadoitusten maastotarkastukset

Verkkotietojärjestelmän sekä vanhojen muuntopiirikarttojen ja urakointikuvien välillä on eroja muuntopiirien maadoituselektrodien lukumäärissä. Koko jakeluverkkoon asennettavien SFS 6000 -standardin vaatimusten mukaiset maadoituskustannukset nousevat 34 220 – 60 600 €:oon, kuten taulukosta 8.1 nähdään. Kustannukset voivat pudota siis reilut 26 000 €, mikäli maadoitukset löytyvät maastosta. Myös lukujen 8.3.1 ja 8.3.2 kustannustarkastelujen kokonaissummat vaihtelevat suurella välillä. Maadoitusten lukumäärät tulisikin käydä tarkastamassa maastossa, sillä tällä on hyvin suuri vaikutus kustannuslaskelmiin ja kannattavuustarkasteluihin. Kun käytössä on todellista tilannetta vastaavat maadoitustiedot, kaikkien laskelmien luotettavuus paranee huomattavasti,

millä voi olla suurikin merkitys parhaan vaihtoehdon valintaan maadoitusjännitteiden pienentämiseksi.

9.6 Uusintamittaukset

Vuonna 2010 mitatuista muuntopiireistä 16 jätettiin pois tarkasteluista, koska niiden mitatut tulokset olivat eri suuruusluokkaa kuin edellisissä mittauksissa saadut arvot. Nämä muuntopiirit tulisi mitata uudestaan, jotta varmistuttaisiin siitä, kummat arvot ovat lähempänä oikeaa tulosta. Näin suljettaisiin pois mahdollisten mittausvirheiden tai muiden tekijöiden vaikutus tuloksiin ja muuntopiirit voitaisiin ottaa mukaan tarkastelun piiriin.

9.7 Muutokset verkkotietojärjestelmään

Verkkotietojärjestelmään on mahdollista lisätä maadoitusmittausten tulokset omalle symbolille, joka on identtinen kj-maadoituksen -symbolin kanssa. Maadoitusmittaukselle olisi hyvä saada oma symboli tai vähintään vaihtaa sen väriä sekaannusten välttämiseksi. Symboliin voidaan liittää resultoivan tulosten lisäksi myös muun muassa käännepistemenetelmän maadoitusarvoja eri jännitepiikin etäisyyksillä, mittauspäivämäärät, mittaajien tiedot sekä maadoitusjänniteluokka. Tämän lisäksi ohjelmalla on mahdollista suorittaa maadoitusmittaustarkistus muuntopiireille ja erottimille maasulkulaskennan yhteydessä. Ohjelma myös laskee suhteellisesti, kuinka suuri ylitys on sallitusta arvosta. Tätä työtä varten tarkistus tehtiin laskemalla ensin johtolähtöjen sallitut maadoitusarvot, jotka vietiin taulukkolaskentaohjelmaan, johon myös mittaustulokset siirrettiin mittauspöytäkirjoista. Jos tulokset löytyisivät tietokannasta, olisi vastaava tehtävä huomattavasti vaivattomampaa ylimääräisten vaiheiden jäädessä pois.

Tietokantaa pyritään myös pitämään mahdollisimman ajantasaisesti jakeluverkon todellisen tilan mukaisena, mikä tukisi myös mittaustietojen vientiä tietokantaan. Näin kaikki oleellinen tieto muuntopiirien maadoitusmittauksiin liittyen löytyisi kaikista työpisteistä, joihin on asennettu verkkotietojärjestelmä. Myös maastotarkastuksista saadut maadoitustiedot tulisi päivittää verkkotietojärjestelmään.

10 YHTEENVETO

Maadoitusjännitteille on määrätty suurimmat sallitut arvot eri tilanteissa, jotta sähkölaitteistoista ei aiheudu vikatilanteessa vaaraa ihmisille tai eläimille. Suomessa maaperä asettaa tiettyjä haasteita maadoitusjännitteiden pitämiseksi sallituissa rajoissa. Tätä ei edesauttanut vuosituhaten vaihteessa voimaan astunut SFS 6001 -standardi, joka tiukensi osittain maadoitusjännitteitä koskevia vaatimuksia. Kiristyneiden sähköturvallisuusmääräysten, huonon maaperän ja nousseiden sähkön laatuvaatimusten takia maasulkuvirran keskitetty kompensointi on yleistynyt Suomessa huomattavasti.

Tämän työn tarkoitus oli selvittää ISSOY:n jakeluverkon maadoitusten nykytila ja tarkastella eri vaihtoehtoja maadoitusjännitteiden pienentämiseksi. Selvityksen perusteella ISSOY:n jakeluverkossa maadoitusjännitteet ovat korkeita valtaosan muuntopiireistä ylittäessä sallitut raja-arvot. Maadoitusjännitteiden pienentämiseksi tutkittiin muutamaa vaihtoehtoa, joista maasulkuvirtaa pienentävää kompensointia tarkasteltiin vikaherkimpiä johtolähtöjä syöttävien Saarlammen, Vennonmäen sekä Syyspohjan sähköasemien kohdalla. Imatran alueella valittiin maasulkureleiden hidastusaikojen lyhentämisen ja lisämaadoitusten rakentamisen yhdistelmä.

Kompensointi osoittautui hyväksi vaihtoehdoksi Saarlammen sähköasemalla, jossa jo keskeytyskustannusten pieneneminen puolsi laitteiston investointia. Sillä ratkaistaan myös liian suurista maadoitusjännitteistä aiheutuva ongelma.

Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien tapauksessa keskeytyskustannuksista saadut säästöt eivät osoittaneet laitteistoon investoimista kannattavaksi. Toisaalta lisämaadoituksista aiheutuvat kustannukset nousisivat huomattavan korkeiksi ja tulevaisuudessa mahdollisesti muuttuva verkon rakenne saattaisi tehdä investoinneista turhia jo lyhyellä aikavälillä. Tämän takia eri vaihtoehtojen keskinäistä paremmuutta pitäisi tutkia uudelleen muutaman vuoden kuluttua, jolloin suljettaisiin pois tiettyjen tekijöiden vaikutus tarkastelun tuloksiin.

Imatran alueen sähköasemilla lisämaadoitusten asentamisella maadoitusjännitteet saataisiin määräysten mukaiselle tasolle kohtuullisin kustannuksin. Kuitenkin myös tässä tapauksessa epävarmuus tulevaisuuden suhteen pakottaa miettimään tarkasti valittavan ratkaisun kannattavuutta.

Kaikissa tapauksissa investointipäätös pitää olla taloudellisesti hyvin perusteltu, jota valitut painotukset voivat ohjata haluttuun suuntaan. Toimenpiteen valinnan apuna käytettävien laskelmien tarkkuuteen ja luotettavuuteen vaikuttavat kuitenkin lähtötietojen todenmukaisuus ja käytettyjen muuttujien tarkkuus, joiden merkitys tässä tarkastelussa on erityisen suuri. Hyvin usein myös tulevaisuuden muutokset tuovat oman epävarmuustekijän tehtävän valinnan kannalta, mikä voi muuttaa eri vaihtoehtojen soveltuvuutta suuntaan tai toiseen. Siksi päätöksen tukena tulee myös käyttää parasta tietoa tulevaisuuden odotettavista muutoksista. Näiden seikkojen nojalla vain keskitetyn kompensointilaitteiston investointi Saarlammen sähköasemalle on perusteltu päätös, jolla sekä parannetaan sähkön laatua että taataan sähkönkäyttäjien turvallisuus minimoiden aiheutuvat kustannukset.

KUVAT

- Kuva 2.1 Palloelektrodi joka suuntaan jatkuvassa väliaineessa, s. 12
- Kuva 2.2 Palloelektrodi maan pinnassa, s. 13
- Kuva 2.3 Palloelektrodi tiettyyn syvyyteen upotettuna, s. 15
- Kuva 2.4 Kaksi palloelektrodia maan pinnassa, s. 16
- Kuva 3.1 Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa, s. 40
- Kuva 3.2 Maasta erotetun verkon sijaiskytkentä, s. 40
- Kuva 3.3 Osoittimet yksivaiheisessa maasulussa, s. 41
- Kuva 3.4 Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa, s. 42
- Kuva 3.5 Sammutetun verkon sijaiskytkentä, s. 43
- Kuva 3.6 Virta- ja nollajänniteosoittimet sammutetussa verkossa, s. 43
- Kuva 3.7 Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi maasta erotetussa verkossa a) ja sammutetussa verkossa b), s. 46
- Kuva 4.1 Voltti-ampeerimenetelmän periaate, s. 50
- Kuva 4.2 Maadoituselektrodien potentiaalintasausrenkaat, s. 51
- Kuva 4.3 Käänne pistemenetelmän mittausperiaate, s. 52
- Kuva 6.1 Maadoitusmittari Chauvin Arnoux A.C 6460 ja VIRVE-radiopuhelin, s. 64
- Kuva 7.1 Sallitun maadoitusjännitteen ylittävät muuntopiirit, s. 73

KUVAAJAT

- Kuvaaja 2.1 Maadoitusjännite etäisyyden funktiona elektrodista, s. 14
- Kuvaaja 2.2 Soraisen hiekkamaan a) ja savilajien b) resistiivisyys kosteuspi-toisuuden funktiona, s.21
- Kuvaaja 2.3 Maadoitusjohtimien ja –elektrodien oikosulkuvirran tiheys G vika-virran kestoajan t_f funktiona, s. 27
- Kuvaaja 2.4 Poikkipinnaltaan pyöreän maadoitusjohtimen jatkuva virta I_D poikkipinnan A funktiona, s. 27
- Kuvaaja 2.5 Sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmässä. s. 30

- Kuvaaja 2.6 A1-93:n (suorat) ja SFS 6001:n (käyrät) kosketusjännitevaatimusten vertailu maasulun keston t_f funktiona, s. 31
- Kuvaaja 3.1 Keskeytysten aiheuttajien viiden vuoden keskiarvo, s. 36
- Kuvaaja 4.1 Maadoituspotentiaali homogeenisessä maaperässä jänniteapu-elektrodin etäisyyden funktiona, s. 53
- Kuvaaja 7.1 Sähköasemien maasulkuvirrat ja kaapelointiasteet, s. 67
- Kuvaaja 7.2 Sähköasemien maasulkuvirrat varasyöttötilanteissa, s. 68
- Kuvaaja 8.1 Kompensoinnin vaikutus Saarlammen keskeytyskustannusten pjk:jen vähetessä asteittain, s. 78
- Kuvaaja 8.2 Kompensoinnin vaikutus Vennonmäen ja Syyspohjan keskeytyskustannuksiin, s. 80
- Kuvaaja 8.3 Maadoituksista aiheutuvat kustannukset Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien johtolähdöillä, s. 86
- Kuvaaja 8.4 Maadoituksista aiheutuvat kustannukset Imatran alueen sähköasemien johtolähdöillä, s. 88
- Kuvaaja 8.5 Kannattavuustarkastelu erilaisilla KAH-arvoilla ja annuiteeteilla, kun kompensointi vähentää pjk:jen määrää 30 %, s. 90

TAULUKOT

- Taulukko 2.1 Maadoitusresistanssin laskentakaavoja, s. 18
- Taulukko 2.2 Eri elektrodien jännitesuppliloiden laskentakaavoja, s. 19
- Taulukko 2.3 Samalla johdinpituudella saavutettavan maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen resistanssiin, s. 19
- Taulukko 2.4 Maalajien, betonin ja veden resistiivisyydet, s. 20
- Taulukko 2.5 Materiaalista riippuvien vakioiden arvot, s. 26
- Taulukko 2.6 Muunnoskertoimet jatkuvan virran loppulämpötilasta 300 °C muuhun lämpötilaan, s. 28
- Taulukko 2.7 Yhteisen maadoituksen käyttö, s. 29
- Taulukko 2.8 Suurimmat sallitut kosketusjännitteet, s. 30
- Taulukko 3.1 Asiakasryhmäkohtaiset ja EMV:n valvontamallin KAH-arvot, s. 33
- Taulukko 5.1 Sähköasemien tiedot, s. 56

- Taulukko 5.2 Energiapainotetut keskeytystunnusluvut, s. 59
- Taulukko 7.1 Maadoitusresistanssien mitoitusvirrat, s. 69
- Taulukko 7.3 Maadoitusjännitteen kannalta huonoimmat johtolähdöt, s. 72
- Taulukko 8.1 Maadoitukset SFS 6000 –standardin vaatimuksen täyttämiseksi, s. 75
- Taulukko 8.2 Hidastusajat ja niiden valinnassa käytetyt tiedot johtolähdöittäin, s. 82
- Taulukko 8.3 Maadoitusrakenteiden yksikkökustannukset, s. 83
- Taulukko 8.4 Tarvittavien rakenteiden lukumäärät Vennonmäen ja Syyspohjan sähköasemien johtolähdöillä, s. 85
- Taulukko 8.5 Tarvittavien rakenteiden lukumäärät Imatran alueen sähköasemien johtolähdöillä, s. 87

LÄHTEET

Aro, M. & Elovaara, J. & Karttunen, M. & Nousiainen, K. & Palva, V. 1996. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY.

Chauvin Arnoux. 2001a. User's manual. C.A 6460.

Chauvin Arnoux. 2001b. User's manual. C.A 6415.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto.

Energiamarkkinavirasto. 2007. Sähkön jakeluverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnin suuntaviivat vuosille 2008 – 2011, Liite 1.
http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Liite1_413-501-424-2007.pdf (Luettu 9.3.2011)

Energiateollisuus. 2010. Keskeytystilasto 2009.
<http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/tilastot/keskeytystilastot/liitteet/keskeytystilasto%202009.pdf?SectionUri=%2ffi%2ftilastot%2f-keskeytystilastot> (Luettu 19.1.2011)

Energiateollisuus. Verkostosuositus TJ 1:05, sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Energiateollisuus ry.

Fingrid Oyj. 2007. Fingrid Oyj:n yleiset liittymisehdot.
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/YLE2007_31.8.2007.pdf (Luettu 2.2.2011)

GTK. Geologian tutkimuskeskus. Karttapalvelu. <http://geomaps2.gtk.fi/geo/> (Luettu 25.2.2011)

Honkapuro, S. & Tahvanainen, K. & Partanen, J. & Lassila, J. & Viljainen, S. & Kaipia, T. Nykyisen valvontamallin toimivuuden ja ohjausvaikutusten arviointi. 2010. Lappeenrannan teknillinen yliopiston raportti.
http://www.emvi.fi/files/LUT_EMV_road_map_raportti_Final.pdf (Luettu 11.2.2011)

Imatran Seudun Sähkö Oy. 2010. Vuosikertomus 2009.
http://www.issoy.fi/images/stories/tiedostot/issoy/issoy_vuosikertomus_2009%20%283%29.pdf (Luettu 29.12.2010)

- Järventausta, P & Mäkinen, A. & Nikander, A. & Kivikko, K. & Partanen, J. & Lassila, J. & Viljainen, S. & Honkapuro, S. 2003. Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa. Energiamarkkinaviraston julkaisuja 1/2003.
http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricitymarkets/research/networkbusiness/Documents/S%C3%84HK%C3%96N-%20LAATU.pdf (Luettu 10.2.2011)
- Karppinen, R. Tarkastusinsinööri. Inspecta Oy. 16.3.2011. Henkilökohtainen tiedonanto.
- Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.
- Maviko Oy. 30.3.2011. Henkilökohtainen tiedonanto.
- Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Otatieto.
- Neuvonen, I. 1979. Jakeluverkkojen maadoitusten mittaus ja valvonta. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Insinööritieto Oy, 1 – 5.
- Nieminen, K. 1979. Maapohjan mittaukset. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Insinööritieto Oy, 1-4.
- Nikander, A. 1994. Maasulkuvikojen aiheuttamien haittojen vähentämismahdollisuudet sähköjakeluverkoissa. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergijärjestelmät. Raportti. Tampere.
- Partanen, J. 2010. Nykyisen valvontamallin ja sen kehitystarpeiden arviointi. Diaesitys. www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Jarmo_Partanen_Valvontamalli_syys2010.ppt (Luettu 11.2.2011)
- Patja, S. 1979. Jakeluverkon maadoitukset. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Insinööritieto Oy, 1-6.
- Pyrhönen, J. 1993. Sähkövoimatekniikan erikoiskysymyksiä -92. Lappeenranta teknillinen korkeakoulu. Lappeenranta.
- Ramdan, E. R. & Mohamad, N. & Ramar, K. 2009. Investigations of two-layer earth parameters at low voltage: measurements and calculations. American journal of engineering and applied sciences: science publications.
<http://www.scipub.org/fulltext/ajeas/ajeas21165-170.pdf> (Luettu 14.2.2011)
- Silvast, A. & Heine, P. & Lehtonen, M. & Kivikko, K. & Mäkinen, A. & Järventausta, P. Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuva haitta. 2005. Teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen yliopisto.
[http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/6AFAFB826AEF5800C22570E600371215/\\$file/74642004.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/6AFAFB826AEF5800C22570E600371215/$file/74642004.pdf) (Luettu 10.2.2011)

Suuronen, M. 2006. Maadoitusten mittaustapojen soveltuvuuden arvionti. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkövoimatekniikka. Opinnäytetyö.
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9857/TMP.objres.648.pdf?sequence=2> (Luettu 23.2.2011)

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2007. SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset. Kyriiri Oy.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2001. SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset. Kyriiri Oy.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL. 2007. Maadoituskirja. Viides painos. Espoo: Sähköinfo Oy

Sähkötarkastuslaitos ry. 1974. Sähköturvallisuusmääräykset.
http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/ohjeet/sahkoturvamaaraukset%20A1_74.pdf (Luettu 25.1.2011)

Tolppanen, A. 1979. Työmaadoittaminen. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Insinööritieto Oy, 1.

Valjus, J. 1979. Maadoituselektrodien teoriaa. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Insinööritieto Oy, 1-15.

LIITE 1

1(1)

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäiskoko				
			Ydinosa			Päällys:e/vaippa	
			Halkaisija (mm)	Poikkipinta (mm ²)	Paksuus (mm)	Yksittäiset arvot (µm)	Keskimääräiset arvot (µm)
Teräs	kuumasinkitty	Nauha ²⁾		90	3	63	70
		Profiili (ml. levyt)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	10				50
	lyijyvaipalla ¹⁾	Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	8			1000	
	päällistetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2000	
	elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	paljas	Nauha		50	2		
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin		25 ³⁾			
		Köysi	1,8*	25 ³⁾			
		Putki	20		2		
	tinattu	Köysi	1,8*	25		1	5
	sinkitty	Nauha		50	2	20	40
		lyijyvaipalla ¹⁾	Köysi	1,8*	25		1000
		Pyöreä johdin		25		1000	

* köyden yksittäisen johtimen halkaisija
¹⁾ ei soveltu upotettavaksi suoraan betoniin
²⁾ nauha, vaissattu tai leikattu pyöristettyillä reunoilla
³⁾ Olosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosioriski ja mekaanisen vaurion riski on alhainen, voidaan käyttää poikkipintaa 16 mm².

Suurjännitejärjestelmän tyyppi		Termiseen kuormitukseen liittyvä virta ¹⁾		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvät virrat	
		maadoitus-elektrodi	maadoitus-johdin		
Maasta erotetut järjestelmät		– ⁶⁾	$I_{KEE}^{n\ 9)}$	$I_E = r \times I_C$ ⁷⁾	
Sammutetut järjestelmät	Sähköasemat, joissa sammutuskelat	– ⁶⁾	$I_{KEE}^{n\ 3)\ 9)}$	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ ²⁾	
	Sähköasemat ilman sammutuskeloja			$I_E = r \times I_{Res}$	
Impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät		$I_{K1}^{n\ 4)}$	$I_{K1}^{n\ 8)}$	I_E ⁵⁾	
Sammutetut järjestelmät ja väliaikaisesti impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät	Sähköasemilla, joilla tähtipiste on väliaikaisesti maadoitettu	$I_{K1}^{n\ 4)}$	$I_{K1}^{n\ 8)}$	I_E ⁵⁾	
	Muilla sähköasemilla	sammutuskelat käytössä	– ⁶⁾	$I_{KEE}^{n\ 3)}$	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ ²⁾
		ilman sammutuskeloja			$I_E = r \times I_{Res}$

¹⁾ Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat on otettava huomioon.

²⁾ Kaavaa voidaan soveltaa vain järjestelmiin, joissa kompensointaste on korkea. Kun kompensoitua järjestelmää käytetään selvästi sivussa resonanssitaajuudesta, on otettava huomioon myös vikapaikassa kulkevan virran loiskomponentti.

³⁾ Sammutuskelojen mitoitusvirrat on otettava huomioon myös kelojen maadoitusjohtimien suunnittelussa.

⁴⁾ Maadoituselektrodijärjestelmän suunnittelussa voidaan ottaa huomioon virran jakautuminen jos on käytössä useita reittejä.

⁵⁾ Yleistä laskentakaavaa ei ole käytössä (ks. esimerkiksi kuva 2.2).

⁶⁾ Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat ovat riittäviä.

⁷⁾ Jos paikallisissa suurjännitejärjestelmissä, esimerkiksi teollisuuslaitoksissa, maasulun todennäköinen kestoaika on huomattavan pitkä, esim. useita tunteja, on syytä käyttää arvoa I_{KEE}^{n} arvon I_E asemasta.

⁸⁾ Käytetään suurempaa arviota I_{KEE}^{n} ja I_{K1}^{n} .

⁹⁾ Jos maadoitusjohdinta rasittava maasulun kokonaiskestoaika on alle 1 s, voidaan käyttää virtaa I_C tai I_{Res} .

Taulukon 5 merkkien selitykset:

I_C Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta.

I_{Res} Maasulun jäännösvirta (ks. kuva 2.3b). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta I_C .

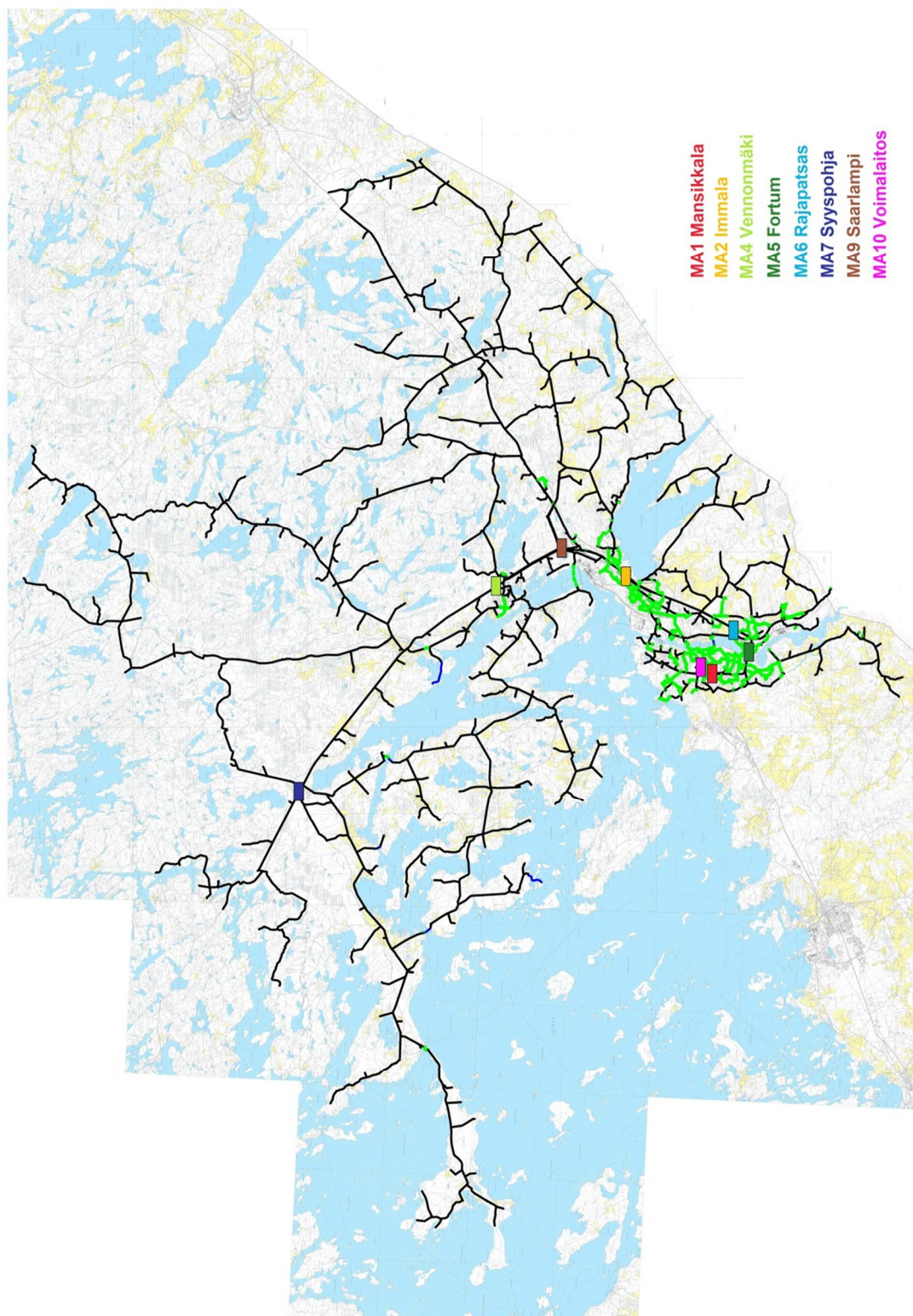
I_L Kyseisen sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa.

I_{KEE}^{n} Kaksoismaasulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti (virralle I_{KEE}^{n} voidaan käyttää maksimiarvona 85 % symmetrisestä alkukoosulkuvirrasta).

I_{K1}^{n} Väiheen ja maan välisen oikosulun (vikaresistanssi on 0) symmetrinen alkukoosulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti.

I_E Maaperään siirtyvä virta (ks. kuva 2.2).

r Reduktiokerroin (ks. liite J). Jos sähköasemalta lähtevillä johdoilla ja kaapeleilla on eri reduktiokerroimet, on määritettävä asianmukainen virta (liitteen N mukaisesti).



MAADOITUKSEN TARKASTUSPÖYTÄKIRJA

Tarkastuskohde

PIIRI		ASEMA			KENNO			Maadoituskohde		Eroittimen paikka			Muuntamon rakenne		Muuntamon tai kytkemön tyyppikoodi	
1	2	3	4	5	6	7	8	14	15	16	22	23	24	28		

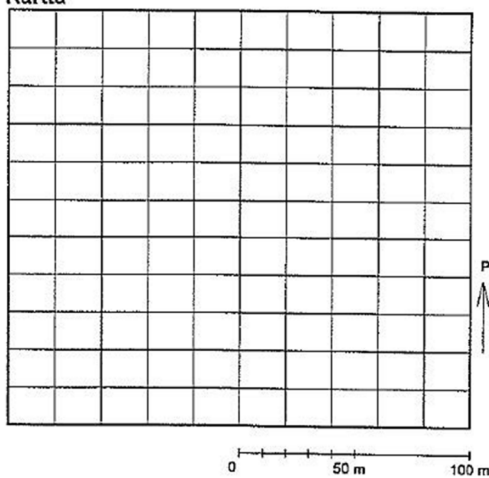
Tarkastaja

Nimi	Pvm
Allekirjoitus	

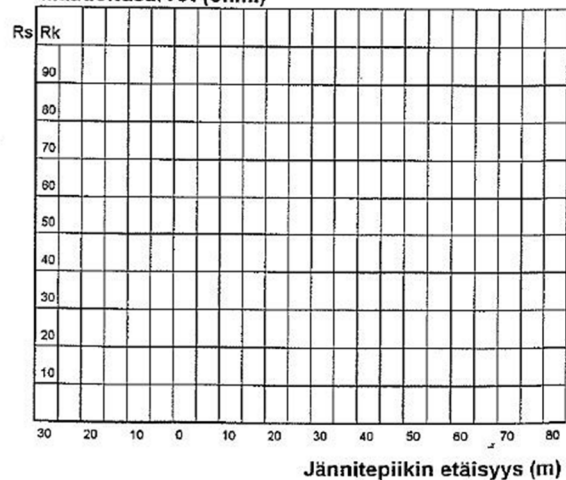
Mittaukset

Toimenpide	Maan ominaisvastus		Suojamaa		Käyttömaa		Resultoiva		Mittatapa	Aine	Rakenne	Toimenpide	Toimenpiteen suorittaja											
	ohmi x m	ohmi	kpl	ohmi	kpl	ohmi	ohmi																	
1=poisto, 3=lisäys	29	30	31	35	36	40	41	42	43	47	48	49	50	54	55	56	57	58	59	60	65	66	75	

Kartta



Maadoitusarvot (ohmi)



Sähköasema	Johtolähtö	Mittaustulokset						Yhteensä (kpl)
		$U_E \leq 2U_{TP}$		$2U_{TP} < U_E \leq 4U_{TP}$		$U_E > 4U_{TP}$		
		(kpl)	(%)	(kpl)	(%)	(kpl)	(%)	
MA1	12 Karhumäki	1	50,0	0	0,0	1	50,0	2
MA1	14 Keskusasema	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA1	16 Mustalampi	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA1	18 Korvenkanta	8	88,9	1	11,1	0	0,0	9
	Yhteensä	11	84,6	1	7,7	1	7,7	13
MA2	10 Virasoja	3	100,0	0	0,0	0	0,0	3
MA2	5 Rautio	7	70,0	1	10,0	2	20,0	10
MA2	6.1 Annala	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA2	6.2 Matara	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA2	6.3 Tienhaara	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA2	6.4 Kurkvuori	5	55,6	2	22,2	2	22,2	9
MA2	9 Rämö	7	77,8	1	11,1	1	11,1	9
	Yhteensä	25	73,5	4	11,8	5	14,7	34
MA4	1 Pappilanlahti	6	100,0	0	0,0	0	0,0	6
MA4	3 Suikkala	14	48,3	9	31,0	6	20,7	29
MA4	5 Rasila	7	87,5	1	12,5	0	0,0	8
MA4	7 Haloniemi	4	33,3	3	25,0	5	41,7	12
MA4	8 Kärinki	14	41,2	14	41,2	6	17,6	34
MA4	9 Ilmajärvi	13	35,1	17	45,9	7	18,9	37
	Yhteensä	58	46,0	44	34,9	24	19,0	126
MA5	1 Rääkkölä	15	78,9	4	21,1	0	0,0	19
MA5	2 Meltola	1	100,0	0	0,0	0	0,0	1
MA5	5 Kuparintie	4	100,0	0	0,0	0	0,0	4
	Yhteensä	20	83,3	4	16,7	0	0,0	24
MA6	02 Teppanala	5	62,5	2	25,0	1	12,5	8
MA6	03 Pietarintie	3	75,0	1	25,0	0	0,0	4
MA6	13 Itä-Siitola	5	83,3	0	0,0	1	16,7	6
MA6	15 Mehiläismäki	10	83,3	2	16,7	0	0,0	12
MA6	17 Jäppilänniemi	10	43,5	5	21,7	8	34,8	23
MA6	18 Linnansuo	2	15,4	10	76,9	1	7,7	13
	Yhteensä	35	53,0	20	30,3	11	16,7	66
MA7	2 Käyhkää	4	25,0	5	31,3	7	43,8	16
MA7	3 Jukajärvi	7	25,0	12	42,9	9	32,1	28
MA7	4 Kotaniemi	4	57,1	2	28,6	1	14,3	7
MA7	5 Kyläniemi	13	35,1	13	35,1	11	29,7	37
MA7	6 Äitsaari	28	57,1	14	28,6	7	14,3	49
	Yhteensä	56	40,9	46	33,6	35	25,5	137
MA9	11 Koivukeskus	2	100,0	0	0,0	0	0,0	2
MA9	13 Rautjärvi	3	8,6	13	37,1	19	54,3	35
MA9	14 Niskapietilä	6	16,2	14	37,8	17	45,9	37
MA9	15 Lohela	1	25,0	2	50,0	1	25,0	4
MA9	16 Miettälä	11	28,9	13	34,2	14	36,8	38
MA9	18 Vennonmäki	1	33,3	2	66,7	0	0,0	3
MA9	19 Ruokolahti	3	37,5	2	25,0	3	37,5	8
MA9	20 Immola	3	100,0	0	0,0	0	0,0	3
MA9	21 Salosaari	5	22,7	10	45,5	7	31,8	22
	Yhteensä	35	23,0	56	36,8	61	40,1	152

